



**Ana Isabel Oliveira
Machado**

**Efeitos de um incêndio florestal na mobilização
de nutrientes do solo**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Maria Isabel da Silva Nunes, Professora Auxiliar Convidada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, e do Professor Doutor Mário Miguel Azevedo Cerqueira, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Tese desenvolvida no âmbito do projeto FIRECNUTS (PTDC/AGRCFL/104559/2008), com apoio financeiro da FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) e com co-financiamento pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do COMPETE – Programa Operacional Factores de Competitividade (POFC)

Dedico este trabalho às pessoas mais importantes da minha vida: a minha família...

o júri

Presidente

Prof.^a Doutora Celeste de Oliveira Alves Coelho

Prof.^a Catedrática do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António José Dinis Ferreira

Prof. Adjunto do Departamento de Ciências Exatas e do Ambiente da Escola Superior Agrária de Coimbra

Prof.^a Doutora Maria Isabel da Silva Nunes

Prof.^a Auxiliar Convidada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Mário Miguel Azevedo Cerqueira

Prof. Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço ao meu namorado Martinho pelo seu apoio constante e por sempre me mostrar o lado positivo das coisas. Sem ele, este último ano teria sido muito mais difícil.

Um grande obrigado à minha família pelo seu apoio incondicional ao longo da minha vida mas sobretudo nestes últimos anos na universidade.

Um obrigado à equipa do FIRECNUTS com quem passei momentos que nunca vou esquecer, quer os dias de ida ao campo sob chuva torrencial, quer os dias calmos e divertidos.

À Raquel, parceira no trabalho de laboratório e nas conversas. Agradeço à Diana pela ajuda nas minhas dúvidas. À Mia, que me acompanhou no extenso tratamento dos dados. E um obrigado ao resto das pessoas que conheci graças a este trabalho e que me acolheram no grupo.

Um agradecimento especial à Renata pela sua disponibilidade, sugestões e revisão deste trabalho.

À Professora Isabel pela orientação, mas sobretudo por me incentivar a ter iniciativa e por me “obrigar a pensar”. Ao Professor Mário pela orientação e ajuda no Sigmaplot.

Ao Jan Jacob Keizer pelo constante incentivo ao longo deste trabalho.

À Doutora Diana pela ajuda no trabalho de laboratório e nas minhas dúvidas.

Por último agradeço o apoio financeiro do projecto FIRECNUTS (PTDC/AGRCFL/104559/2008) que me permitiu realizar este trabalho.

palavras-chave

Escurrência, erosão, incêndios florestais, nutrientes.

resumo

Foi estudada a mobilização após fogo de quatro nutrientes (potássio, cálcio, sódio, magnésio) por escurrência superficial a duas escalas – microparcela e encosta - numa área no concelho de Sever do Vouga que ardeu durante o verão de 2010. Para tal, foram seleccionadas três encostas queimadas, com dois usos do solo (Eucalipto e Pinheiro bravo) e dois tipos de geologia (granito e xisto). Para termos de referência foi igualmente estudada uma encosta não queimada próxima da área de estudo, com Eucalipto e rocha mãe de xisto. Foram colectadas e analisadas amostras de escurrência referentes aos primeiros seis meses após incêndio, e amostras de solo a 0-2 cm de profundidade e cinzas. A análise laboratorial envolveu digestão ácida e determinação das concentrações dos nutrientes por espectroscopia atômica.

As três encostas queimadas apresentaram conteúdos de nutrientes semelhantes, não só nas camadas de cinzas mas também nas camadas superiores do solo (0-2 cm). Houve ainda diferenças mínimas entre as reservas de nutrientes do solo nos dois eucaliptais queimado e não queimado com geologia de xisto, sugerindo que o impacto direto do incêndio sobre os nutrientes no solo foi limitado. Dos nutrientes analisados, para o solo a 0-2 cm de profundidade, foram encontradas maiores quantidades de potássio e nas cinzas maiores quantidades de cálcio. No que disse respeito às perdas dos nutrientes por escurrência superficial verificou-se que na comparação entre escalas existe uma maior mobilização de nutrientes e escurrência nas microparcelas. Observou-se que o potássio foi o nutriente mais mobilizado pela escurrência. As encostas queimadas possuem uma maior perda de nutrientes que a encosta não ardida.

Keywords

Erosion, nutrients, overland flow, forest wildfire

Abstract

Post-fire mobility by overland flow of four soil nutrients (potassium, calcium, sodium, magnesium) was studied for two scales – microplot and hillslope, in an area in the county Sever do Vouga that burned in the summer of 2010. For that, three burnt slopes were selected, with two land uses (*Eucalyptus globulus* and *Pinus pinaster*) and two types of geology (granite and schist). For reference terms, one unburnt slope was also studied in a neighboring area, with eucalyptus and schist bedrock.

Overland flow samples were collected and analyzed for the first six months after fire. Soil samples at 0-2 cm depth were also collected and analyzed as well as ashes. The samples laboratorial analyses involved acid digestion and the nutrients concentration determination was made by atomic spectroscopy.

The burnt slopes present a similar nutrient stock for the ash and 0-2 cm soil layers. There were minimal differences in the burnt and unburned eucalyptus slopes with the same geology, suggesting that the impact of the fire in the nutrient stocks was limited. For the 0-2 cm soil depth were found large amounts of K, and for the ashes large amounts of Ca. Comparing scales, there is a greater overland flow, sediments and nutrient losses at the microplot scale. In the overland flow samples were observed greater losses of K nutrient. The burned slopes have greater nutrient loss comparing with the unburned slope.

ÍNDICE

Índice de Figuras	ii
Índice de Tabelas	iii
Notação	iv
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	2
1.2 Ciclo dos nutrientes.....	3
1.3 Impacte dos incêndios florestais no ciclo de nutrientes	7
1.4 Objectivos e estrutura da dissertação	10
Capítulo 2 - Efeitos de um incêndio florestal na mobilização de nutrientes do solo.....	11
2.1 Resumo.....	12
2.2 Abstract.....	13
2.3 Introdução	13
2.4 Área de estudo.....	15
2.5 Material e métodos.....	16
2.5.1 Desenho experimental	16
2.5.2 Amostras de escorrência.....	19
2.5.3 Amostras de solo	20
2.6 Resultados	21
2.6.1 Nutrientes no solo e nas cinzas.....	21
2.6.2 Valores globais de escorrência e perdas de nutrientes e sedimentos	22
2.6.3 Variação temporal da mobilização de nutrientes	24
2.6.3.1 Concentração de nutrientes nas amostras de escorrência.....	24
2.6.3.2 Massa de nutrientes mobilizada.....	29
2.6.3.3 Evolução temporal dos factores que influenciam a perda de nutrientes.....	32
2.7 Discussão	36
2.8 Conclusões	42
Capítulo 3 - Considerações Finais	43
Referências Bibliográficas	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Número de ocorrências de incêndios florestais e respectiva área ardida (ha) de 1980 a 2006. (Fonte: DGRF, n.d.)	2
Figura 2 - Esquema do ciclo de nutrientes numa floresta (Adaptado de Attiwill e Adams, 1993).	4
Figura 3 - Área de estudo	16
Figura 4 - Parcelas da área de estudo. (a) microparcels; (b) parcelas abertas.....	18
Figura 5 - Concentração de nutrientes, em amostras de escorrência, nas microparcels nas diferentes encostas.	26
Figura 6 - Concentração de nutrientes, em amostras de escorrência, nas parcelas abertas nas diferentes encostas.	28
Figura 7 - Mobilização de nutrientes, em amostras de escorrência, nas microparcels nas diferentes encostas.....	30
Figura 8 - Mobilização de nutrientes, em amostras de escorrência, nas parcelas de encosta nas diferentes encostas.....	31
Figura 9 - Evolução temporal da precipitação e escorrência, nas microparcels das encostas estudadas.	33
Figura 10 - Evolução temporal da precipitação e escorrência, nas parcelas abertas das encostas estudadas.	33
Figura 11 - Evolução temporal da precipitação e perda de sedimentos, nas microparcels das encostas estudadas.	34
Figura 12 - Evolução temporal da precipitação e perda de sedimentos, nas parcelas abertas das encostas estudadas.	35
Figura 13 - Evolução temporal da precipitação e intensidade máxima em 30 minutos.....	35

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Características gerais das encostas estudadas.	19
Tabela 2 - Métodos de análise para a determinação das concentrações dos quatro nutrientes.....	20
Tabela 3 - Concentrações médias de nutrientes nas cinzas (g/kg) e no solo superficial (0-2 cm: g/kg) durante o primeiro e sexto mês pós-fogo.	22
Tabela 4 - Escorrência superficial e perda de nutrientes e sedimentos nas microparcelas das encostas queimadas durante os primeiros seis meses após o incêndio.....	23
Tabela 5 - Escorrência superficial e mobilização de nutrientes e sedimentos nas parcelas de encosta, das quatro encostas de estudo durante os primeiros seis meses após o incêndio.	23

NOTAÇÃO

A_{parcela}	Área da parcela	[m ²]
I_{30}	Intensidade de precipitação em 30 min	[mm/h]
m_i	Massa mobilizado nutriente i	[mg/L]
n	Número de pontos	
$V_{\text{escorrência}}$	Volume de escorrência	[L]

Siglas e acrónimos

BP	“Bounded Plot”
CTC	Complexo de Troca Catiónica
FEC	Fotometria de Emissão de Chama
EAA	Espectroscopia de Absorção Atómica
OP	“Open Plot”
SST	Sólidos Suspensos Totais
USDA	United States Department of Agriculture

Nomenclatura Química

B	Boro
C	Carbono
Ca	Cálcio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CaMg(CO ₃) ₂	Dolomite
CaSO ₄	Sulfato de cálcio
CO ₂	Dióxido de carbono
Cl	Cloro

Cu	Cobre
Fe	Ferro
H ₂ O	Água
K	Potássio
Mg	Magnésio
Mn	Manganésio
Mo	Molibdénio
N	Azoto
Na	Sódio
O	Oxigénio
P	Fósforo
S	Enxofre
Zn	Zinco

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A floresta portuguesa possui um elevado valor social e económico para o país, ocupando uma área de 3.458.557 ha, representando 39% da ocupação do solo em Portugal continental (IFN5, 2006). Segundo o documento da Estratégia Nacional para as Florestas (DGRF, 2006), Portugal obtém da sua área florestal 334 euros/ha/ano, sendo o país do mediterrâneo que retira mais riqueza deste bem.

Nas últimas décadas houve um aumento preocupante do número de incêndios florestais e da área ardida (vide Figura 1), fazendo com que se tornasse um tema de preocupação nacional. Depois de 2003, ano em que a área ardida atingiu o valor máximo nos últimos 20 anos, foram elaborados planos e estratégias de prevenção dos incêndios florestais, bem como planos de mitigação dos efeitos do fogo e a recuperação das áreas queimadas.

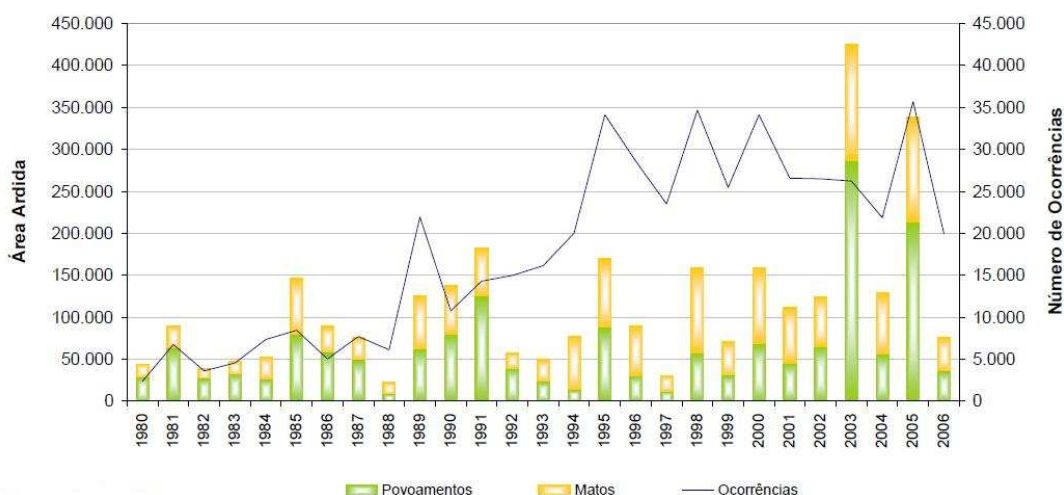


Figura 1 - Número de ocorrências de incêndios florestais e respectiva área ardida (ha) de 1980 a 2006. (Fonte: DGRF, n.d.)

Para poder atuar na recuperação das áreas ardidas é necessário, primeiro, entender os efeitos do fogo nos ecossistemas em que este incide. O crescente interesse e apoio à floresta e aos incêndios que a fustigam, manifesta-se também ao nível de estudos e projetos nestas temáticas.

No âmbito dos nutrientes, os primeiros estudos realizados em Portugal foram realizados por Thomas *et al.* (1999, 2000a, 2000b), financiados pelo projeto europeu IBERLIM – “Land management practice and erosion limitation in contrasting wildfire and gullied locations in the Iberian Peninsula”, que tinham como objectivo a compreensão dos efeitos dos fogos e das práticas de reflorestação. Nesta

investigação foram estudadas as perdas da fracção solúvel e permutável de nutrientes, nos sedimentos arrastados e na escorrência após incêndio florestal, assim como a influência da aplicação de algumas técnicas de mitigação de erosão após incêndio, na mobilização dos nutrientes.

Mais tarde surge um estudo de Ferreira *et al.* (2005), realizado com o apoio do projeto CLIMED – “Effects of climate change and climate variability in water availability and water management practices in Western Mediterranean”, que avalia as estratégias para o risco de inundação e seca face às alterações globais, do projecto FAIR - “Development of Amelioration Strategies to reduce Environmental Deterioration and Agricultural Productions Losses in Water Repellent Regions”, e ainda com o apoio do projecto SILVAQUA – “Avaliação dos impactes das alterações climáticas sobre os recursos hídricos e a fixação de CO₂ por povoamentos florestais de crescimento rápido em Portugal”. Neste trabalho os autores estudam as implicações hidrológicas do incêndio florestal e a associada exportação dos nutrientes na escorrência.

O projeto FIRECNUTS – “Efeitos de fogos florestais na quantidade e dinâmica de carbono e nutrientes no solo e na sua exportação por escorrência superficial” (PTDC/AGRCFL/104559/2008), onde o presente trabalho se insere, vem contribuir para uma melhor compreensão dos impactes dos incêndios florestais na mobilização dos nutrientes neste ecossistema florestal. O projeto possui várias ramificações na sua investigação, atuando em diferentes grupos de estudo: (i) C (carbono) e matéria orgânica, (ii) nutrientes N (azoto) e P (fósforo) e (iii) os catiões Na⁺ (sódio), K⁺ (potássio), Ca²⁺ (cálcio) e Mg²⁺ (magnésio).

Os trabalhos de investigação realizados no âmbito da quantificação da perda de nutrientes do solo, após a ocorrência de incêndios florestais, têm-se focalizado principalmente na fracção dissolvida e na permutável. O presente trabalho pretende dar uma contribuição para o conhecimento desta área tão pouco explorada, incidindo na quantificação dos nutrientes, sódio (Na⁺), potássio (K⁺), cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺), na forma total (dissolvida e particulada), mobilizados do solo após o fogo.

1.2 Ciclo dos nutrientes

O solo possui um papel importante no crescimento e gestão da floresta, uma vez que fornece humidade e nutrientes para o crescimento da vegetação, e serve como suporte e meio para o crescimento das raízes. Assim, a produtividade do solo florestal

é importante, pois a sua diminuição prejudica a biodiversidade e as suas populações de microrganismos.

O conhecimento e a compreensão do ciclo de nutrientes num ecossistema florestal são necessários, uma vez que este, ao contrário de terrenos agrícolas, não possui adições externas de nutrientes para aumentar a sua produtividade.

O ciclo de nutrientes é representado pelas suas adições, perdas, consumos e retenção num ecossistema (vide Figura 2). A sustentabilidade de um ecossistema requer uma contínua e eficiente recirculação/renovação dos nutrientes. Estes são adicionados por precipitação (deposição húmida), deposição seca (incluído queda das folhas, ramos e outros materiais orgânicos da vegetação), decomposição, fixação e meteorização geoquímica das rochas. Os nutrientes podem ser consumidos e retidos pela vegetação e pela população de microrganismos. Por sua vez, as perdas de nutrientes são mínimas e podem ocorrer por erosão, lixiviação, volatilização, desnitrificação. (Neary *et al.*, 2005; Raison *et al.*, 2009).

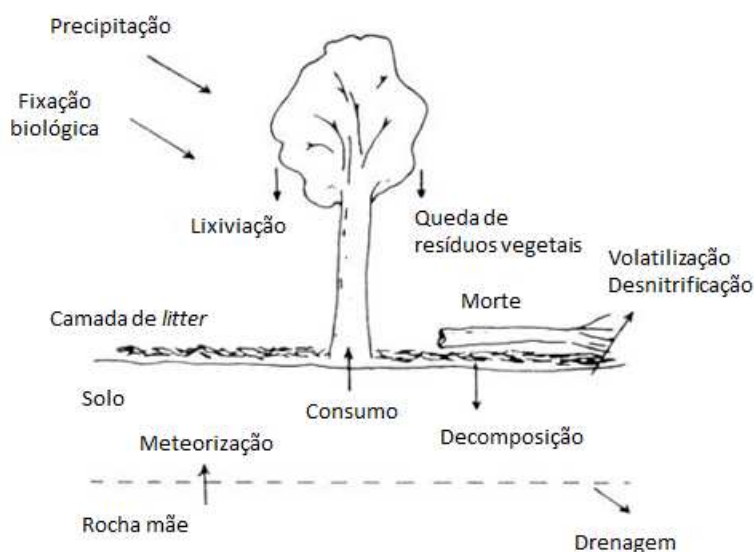


Figura 2 - Esquema do ciclo de nutrientes numa floresta (Adaptado de Attiwill e Adams, 1993).

Os nutrientes com maior importância para o crescimento das plantas são o N, P e o K. No entanto, nutrientes como o Ca, Mg e Na não podem ser esquecidos, sendo fundamentais, quer a nível de crescimento quer a nível de proteção e suporte na relação planta-solo. De acordo com a percentagem com que aparecem nas plantas, os nutrientes são classificados como macronutrientes (C, O, N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Mn, Fe, Zn, Cu, B, Cl e Mo) (Costa, 2004).

As plantas apresentam quantidades elevadas de todos os macronutrientes, o que significa que, para que os possam acumular, tem de haver um fornecimento contínuo pelas raízes. O teor dos nutrientes nas plantas depende da sua mobilização do solo para a água e da taxa a que são absorvidos (Varennnes, 2003).

Ao nível da nutrição das plantas os nutrientes encontram-se sob três formas: não assimilável, permutável e dissolvida. Na forma não assimilável o nutriente faz parte de um composto e não pode ser absorvido pelas raízes sem uma considerável alteração ou decomposição deste. A forma permutável refere-se aos iões adsorvidos na superfície das partículas da fracção mineral sólida ou da fracção orgânica do solo, sendo uma grande percentagem deste, assimilável pelas plantas. Os elementos dissolvidos na água do solo constituem normalmente a forma mais facilmente assimilável dos nutrientes (Costa, 2004).

Neste estudo efetuou-se uma quantificação total dos nutrientes, englobando todas estas diferentes formas. Os nutrientes estudados foram: potássio, cálcio, magnésio e sódio.

O catião potássio é essencial para o crescimento das plantas e é o mais importante, do ponto de vista quantitativo, a nível da nutrição. Ele encontra-se no solo sob as três formas mencionadas anteriormente: (i) não assimilável, encontrado nos minerais, tais como as argilas e feldspatos, (ii) o permutável, por sua vez, refere-se à fracção que se encontra retida entre os agregados de certos minerais argilosos e (iii) na forma dissolvida, que corresponde à fracção que se encontra dissolvida na água (Tan, 1996). O potássio assimilável pelas plantas engloba as últimas duas formas, sendo assim frequente encontrar-se testes para a determinação do potássio permutável ou para o dissolvido, no contexto do estudo sobre plantas e o seu crescimento.

As principais fontes minerais de cálcio no solo são a calcite, a aragonite, a dolomite (as várias formas cristalinas do carbonato de cálcio – CaCO_3) e o gesso (sulfato de cálcio hidratado $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$). A maioria dos solos possui cálcio suficiente para assegurar a nutrição das plantas, no entanto, solos ácidos têm, geralmente, menor quantidade de cálcio disponível para as plantas que os neutros ou alcalinos.

À semelhança do cálcio, o magnésio encontra-se em quantidades abundantes no solo e é libertado por meteorização de minerais e posteriormente absorvido pelas plantas no complexo de troca (CTC), quando se encontra em solução. No solo, a dolomite - $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ é a principal forma mineral do magnésio, sendo encontrada nas rochas sedimentares, como o calcário dolomítico. Através da dissolução destas rochas, por reação com o dióxido de carbono (CO_2) na água, o catião Mg^{2+} , assim como o Ca^{2+} ,

são libertados na forma disponível para serem absorvidos pelas plantas. Em contacto com elevadas concentrações de sulfato, hidrogenocarbonato e fosfato, o ião pode precipitar, assim como acontece ao cálcio.

O catião sódio é um elemento benéfico ao crescimento de algumas plantas, visto ser um estimulante do seu crescimento, nomeadamente as que possuem uma fotossíntese em C4¹ (Varennnes, 2003). Por ser um catião desvalorizado ao nível da nutrição das plantas, o seu estudo não é geralmente realizado em termos da sua fracção disponível. Todavia, este catião apresenta um papel importante nas condições físicas do solo, como por exemplo elevadas concentrações de Na no solo podem levar a uma tendência para a desagregação das partículas. Assim, ao sódio geralmente estão associados testes no âmbito, por exemplo, da caracterização do solo ou determinação da CTC (Tan, 1996). É um dos elementos abundantes na crosta terrestre e possui um comportamento semelhante ao do cálcio e magnésio, encontrando-se no solo em minerais como o feldspato.

Segundo Costa (2004), os nutrientes existentes no solo na forma permutável encontram-se numa fracção mínima do total. Um bom exemplo é o potássio, que nesta forma apenas está presente em 1 a 2%, enquanto o magnésio e sobretudo o cálcio existem, na forma permutável, em maiores quantidades. Já na forma dissolvida o cálcio encontra-se no solo numa porção 10 vezes superior ao potássio.

É importante determinar a quantidade total dos nutrientes uma vez que, além de uma grande fracção se encontrar na forma não assimilável, isto é, fixa nas partículas minerais, estes são uma grande fonte de reserva dos nutrientes que ao longo do tempo vão sendo disponibilizados por processos de meteorização.

Ao realizar-se um corte vertical no solo expõe-se várias camadas com aspecto e constituição diversa, chamados *horizontes do solo*, que são o resultado de processos físicos, químicos e biológicos, que ocorrem simultaneamente. A disposição destes horizontes desde a camada superficial até à rocha-mãe é designada por *perfil do solo*. Na recente taxonomia, estas camadas são classificadas por ordem de profundidade de O, A, E, B, C e R, havendo subdivisões para uma caracterização mais específica e podem ser distinguidas através das suas variadas propriedades como a cor, textura e estrutura (Neary *et al.*, 2005).

Num ecossistema florestal, é na camada superficial (O) que se encontram as maiores quantidades de nutrientes assimiláveis para as plantas. Este horizonte é composto principalmente por matéria orgânica em vários estágios de decomposição, fazendo

¹ Fotossíntese que envolve um ácido com quatro átomos de carbono.

com que seja uma zona com elevada CTC, atuando como um importante reservatório dos cátions assimiláveis pelas plantas, prevenindo assim a perda destes nutrientes por lixiviação (Neary *et al.*, 2005).

Os incêndios florestais, por sua vez, induzem alterações no ciclo de nutrientes, quer pela instantânea disponibilização dos nutrientes através da combustão da matéria orgânica, que seria libertada gradualmente ao longo do tempo, quer pelas perdas diretas e/ou indiretas, que ocorrem como uma inevitável consequência.

1.3 Impacte dos incêndios florestais no ciclo de nutrientes

Os efeitos de um incêndio florestal no solo têm sido amplamente estudados, quer a nível de microparcelas (Coelho *et al.*, 2004; Cerdà e Doerr, 2005; Ferreira *et al.*, 2005; Cerdà e Doerr, 2008), grandes parcelas (Thomas *et al.*, 1999, 2000a, 2000b; Coelho *et al.*, 2004; Ferreira *et al.*, 2005), encostas (Keizer *et al.*, 2008) e bacias (Ferreira *et al.*, 2000). Após um incêndio existem acentuados impactes hidrológicos a nível do solo, da vegetação, da manta morta ("litter") e no comportamento da escorrência à escala de parcela, encosta e bacia, associados à erosão (Shakesby, 2011). Estes passam pela combustão da vegetação e "litter", destruição das camadas superiores do solo, compostas por matéria orgânica, aquecimento do solo que tende a alterar as suas características físicas e químicas, incluído alterações na repelência à água e estabilidade das partículas, promovendo um aumento da escorrência e erosão (Shakesby e Doerr, 2006).

Como resultado destes efeitos vêm associadas perdas de nutrientes, através de diversos processos:

- combustão da vegetação e "litter", onde os seus nutrientes são perdidos para a atmosfera por volatilização (Trabaud, 1994; Yildiz *et al.*, 2010) e com a consequente produção de uma camada superficial de cinzas rica em nutrientes e facilmente erodida (Thomas *et al.*, 1999);
- destruição da matéria orgânica no solo, diminuindo as zonas com elevada CTC, que retinham os nutrientes;
- alterações do regime hidrológico do solo, como o aumento da repelência à água e a associada diminuição da capacidade de infiltração da água, promovendo o aumento da taxa de escorrência, sendo os nutrientes na forma

solúvel facilmente lixiviados (Thomas *et al.*, 2000b; Ferreira *et al.*, 2005; Raison *et al.*, 2009);

- destruição da vegetação que protege o solo contra o impacto da chuva, associada às alterações da estabilidade das partículas, fazem com que aumente a erosão após fogo, provocando uma perda dos nutrientes retidos nos sedimentos (Helvey *et al.*, 1985; Thomas *et al.*, 1999), podendo produzir efeitos negativos na reserva de nutrientes e na fertilidade do solo (Raison *et al.*, 2009).

A intensidade destes efeitos varia com a severidade do incêndio e as temperaturas por ele alcançadas. Segundo Neary *et al.* (2005), de modo geral um incêndio nunca aumenta a quantidade de nutrientes, mas sim diminui ou não afecta. Estas variações dependem da intensidade do fogo e da temperatura de volatilização de cada elemento (Johnson *et al.*, 2007). No entanto, incêndios de baixa intensidade podem aumentar a produtividade do solo da área ardida (Carter e Foster, 2004), uma vez que os nutrientes que estavam retidos no tecido das plantas e matéria orgânica existente no solo, são libertados, não aumentando a sua quantidade, mas sim disponibilizando-os sob formas mais acessíveis para as plantas, atuando como um fertilizante. Enquanto que as baixas temperaturas se encontram associadas a fogos controlados, para incêndios florestais sem controlo humano as temperaturas atingidas são bastante mais elevadas. Neste último caso, os valores de temperatura possíveis de atingir são difíceis de quantificar, uma vez que só é possível determiná-los após a ocorrência do incêndio e através dos efeitos que ele provocou. O regime do fogo (a sua intensidade e severidade), associado às características da área e da sua vegetação vai determinar a gama de impacte do incêndio sob o ciclo de nutrientes e sob as propriedades e processos que ocorrem no ecossistema florestal (Raison *et al.*, 2009).

Os nutrientes analisados neste estudo possuem temperaturas de volatilização bastante elevadas: K > 760°C, Na > 880°C, Mg > 1107°C e Ca > 1240°C (Weast, 1988 apud Ferreira *et al.*, 2009). As perdas, por volatilização, destes metais durante o fogo, apenas acontecem quando os incêndios possuem elevada severidade, onde estas temperaturas sejam alcançadas. À combustão da vegetação existem vários impactes associados, que provocam a perda de nutrientes. Como foi referido anteriormente, inerente à sua destruição ocorre a formação de uma camada de cinzas, que por ser rica em nutrientes e facilmente erodida, representa um dos principais meios de perda de nutrientes que ocorre após incêndio. A escorrência remove principalmente as partículas finas e matéria orgânica, levando a um enriquecimento de nutrientes do material erodido e potenciando a deterioração da qualidade do solo (Thomas *et al.*,

1999). Outra implicação associada à destruição da vegetação e da camada de “litter”, é a diminuição da proteção do solo para processos erosivos, como o “rainsplash” (a dispersão das partículas da camada superior do solo, tornando-as vulneráveis a serem arrastadas por escorrência), o aumento da escorrência, uma vez que o coberto (agora inexistente) atuava como um retentor e retardador deste processo, formando obstáculos e a diminuição da estabilidade do solo, uma vez que as raízes das plantas aumentam a resistência à erosão.

Shakesby (2011) refere que associada a um incêndio existe uma alteração da repelência do solo à água, havendo de forma geral o seu aumento, com consequente perda de nutrientes na forma solúvel e por transporte de sedimentos ricos em nutrientes. Porém, para solos que antes do fogo possuam uma elevada repelência, quer seja pelo tipo de vegetação associada, ou pelo incêndio se dar após um período seco (Cerdà e Doerr, 2005; Keizer *et al.*, 2008), pode existir uma ligeira diminuição deste parâmetro, associada a incêndios severos.

Shakesby e Doerr (2006) explicam que após um incêndio, a camada superior do solo pode ter uma diminuição na repelência à água, devido: à volatilização de partículas orgânicas hidrofóbicas para a atmosfera durante o fogo; ao seu transporte pela encosta até arrefecerem e à transferência desta repelência para camadas mais profundas, como consequência da existência de um gradiente de pressão aquando o aquecimento do solo. Este fenómeno irá fomentar um pequeno aumento da capacidade de infiltração do solo, comparativamente a áreas não ardidas, mas esta diminuição é logo quebrada assim que se atinge o limiar da capacidade de infiltração, iniciando-se o processo de escorrência. Por sua vez, esta escorrência vai também aumentar devido ao impacte do aquecimento do solo pelo incêndio, que provoca uma degradação da sua estrutura, reduzindo a sua porosidade, que consequentemente diminui a capacidade de infiltração. A camada de cinzas, por sua vez, também contribui para a diminuição da capacidade de infiltração do solo, visto que as suas partículas finas poderão obstruir os poros.

Segundo Ferreira *et al.* (2005), os incêndios florestais, no norte e centro de Portugal, consomem as camadas L, F e H (quando esta existe), pertencentes ao *horizonte O*, ricas em matéria orgânica, assim como a vegetação mais profunda. Este tipo de material está localizado nas camadas superficiais, estando assim mais vulneráveis aos efeitos do fogo. As partículas minerais não são tão afectadas pelo fogo, uma vez que, além de estarem situadas em camadas mais profundas, para a sua destruição ocorrer os incêndios teriam que atingir temperaturas bastantes elevadas (700° C a 800°C) que apenas incêndios extremamente severos conseguiriam atingir (Neary *et al.*, 2005).

Ferreira *et al.* (2005) observaram importantes perdas de nutrientes no primeiro grande evento que atingiu o limiar da capacidade de infiltração da camada de cinzas, e que promoveu assim o processo de escorrência. Neste estudo, os autores referem ainda que, é no primeiro período de quatro meses após incêndio que se dão as principais perdas de nutrientes, associadas à perda da camada de cinzas rica em nutrientes e facilmente mobilizada. Porém, Thomas *et al.* (1999, 2000a, 2000b) dizem que continuam a existir perdas significativas de nutrientes no segundo e terceiro ano após incêndio, período ao final do qual começa a haver uma diminuição da escorrência e na perda de sedimentos.

1.4 Objectivos e estrutura da dissertação

Com o presente trabalho pretende-se avaliar o efeito de um incêndio florestal na exportação dos nutrientes cálcio, magnésio, sódio e potássio do solo, por escorrência, a escala de microparcela e de encosta.

Os objectivos específicos são:

- Verificar a reserva de nutrientes do solo, e na camada de cinzas após fogo;
- Avaliar a influência na mobilização de nutrientes, do tipo de uso florestal do solo, da geologia e da escala (microparcela e encosta) em áreas recentemente ardidas);
- Estabelecer as relações entre as perdas de nutrientes e os processos hidrológicos e erosivos (precipitação, intensidade, escorrência, e perda de sedimentos), pós fogo à escala de microparcela e encosta.

Este documento inicia-se com este primeiro capítulo, onde se refere a motivação e importância da sua realização, seguindo-se uma breve introdução ao tema do ciclo de nutrientes numa área florestal e como este é afectado por um incêndio.

O segundo capítulo corresponde ao estudo propriamente dito, redigido na forma de artigo, onde se apresentam as características gerais da área de estudo, a metodologia aplicada, os resultados obtidos, a sua discussão e as principais conclusões. No terceiro capítulo são tecidas as considerações finais deste estudo, e indicadas algumas recomendações para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2 - EFEITOS DE UM INCÊNDIO FLORESTAL NA MOBILIZAÇÃO DE NUTRIENTES DO SOLO

Efeitos de um incêndio florestal na mobilização de nutrientes do solo

Machado, A. I. O.*; Nunes, M. I.; Cerqueira, M. M. A.**; Pinto, R.**;**

Keizer, J. J.**

* Departamento do Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro

** CESAM - Centro de Estudos do Ambiente e do Mar, Departamento do Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro

2.1 Resumo

Foi estudada a mobilização após fogo de quatro nutrientes (potássio, cálcio, sódio, magnésio) por escorrência superficial a duas escalas – microparcela e encosta - numa área no concelho de Sever do Vouga que ardeu durante o verão de 2010. Para tal, foram seleccionadas três encostas queimadas, com dois usos do solo (*Eucalipto* e *Pinheiro bravo*) e dois tipos de geologia (granito e xisto). Para termos de referência foi igualmente estudada uma encosta não queimada próxima da área de estudo, com Eucalipto e rocha mãe de xisto. Foram colectadas e analisadas amostras de escorrência referentes aos primeiros 6 meses após incêndio, e amostras de solo a 0-2 cm de profundidade e cinzas. A análise laboratorial envolveu digestão ácida e determinação das concentrações dos nutrientes por espectroscopia atómica.

As três encostas queimadas apresentaram conteúdos de nutrientes semelhantes, não só nas camadas de cinzas mas também nas camadas superiores do solo (0-2 cm). Houve ainda diferenças mínimas entre as reservas de nutrientes do solo nos dois eucaliptais queimado e não queimado com geologia de xisto, sugerindo que o impacto direto do incêndio sobre os nutrientes no solo foi limitado. Dos nutrientes analisados, para o solo a 0-2 cm de profundidade, foram encontradas maiores quantidades de potássio e nas cinzas maiores quantidades de cálcio. No que disse respeito às perdas dos nutrientes por escorrência superficial verificou-se que na comparação entre escalas existe uma maior mobilização de nutrientes e escorrência nas microparcelas. Observou-se que o potássio foi o nutriente mais mobilizado pela escorrência. As encostas queimadas possuem uma maior perda de nutrientes que a encosta não ardida.

Palavras-chave: Escorrência, erosão, incêndios florestais, nutrientes.

2.2 Abstract

Post-fire mobility by overland flow of four soil nutrients (potassium, calcium, sodium, magnesium) was studied for two scales – microplot and hillslope, in an area in the county Sever do Vouga that burned in the summer of 2010. For that, three burnt slopes were selected, with two land uses (*Eucalyptus globulus* and *Pinus pinaster*) and two types of geology (granite and schist). For reference terms, one unburnt slope was also studied in a neighboring area, with eucalyptus and schist bedrock.

Overland flow samples were collected and analyzed for the first six months after fire. Soil samples at 0-2 cm depth were also collected and analyzed as well as ashes. The samples laboratorial analyses involved acid digestion and the nutrients concentration determination was made by atomic spectroscopy.

The burnt slopes present a similar nutrient stock for the ash and 0-2 cm soil layers. There were minimal differences in the burnt and unburned eucalyptus slopes with the same geology, suggesting that the impact of the fire in the nutrient stocks was limited. For the 0-2 cm soil depth were found large amounts of K, and for the ashes large amounts of Ca. Comparing scales, there is a greater overland flow, sediments and nutrient losses at the microplot scale. In the overland flow samples were observed greater losses of K nutrient. The burned slopes have greater nutrient loss comparing with the unburned slope.

Keywords: Erosion, nutrients, overland flow, forest wildfire

2.3 Introdução

Em Portugal, na última década, tem existido um aumento do número de incêndios florestais, e da área ardida, associados parcialmente à falta de controlo/gestão da quantidade de biomassa nas florestas (Ferreira *et al.*, 2005).

São vários os trabalhos (Trabaud, 1994; Thomas *et al.*, 1999; Johnson *et al.*, 2007) que indicam que, após um incêndio existe associada uma perda de nutrientes através dos processos: volatilização, transporte de cinzas, escorrência e erosão. A combustão da vegetação e “litter” provoca a perda de nutrientes para a atmosfera por volatilização (Trabaud, 1994; Yildiz *et al.*, 2010) e a formação de uma camada superficial de cinzas

rica em nutrientes e facilmente erodida (Thomas *et al.*, 1999). O fogo provoca alterações hidrológicas do solo, como o aumento da repelência à água e diminuição da capacidade de infiltração da água, induzindo o aumento da taxa de escorrência, sendo os nutrientes na forma solúvel facilmente lixiviados (Thomas *et al.*, 2000b; Ferreira *et al.*, 2005). Paralelamente, o aumento da erosão provocado pelo fogo através da destruição da vegetação que protege o solo contra o impacto da chuva (efeito “rainsplash”), associada às alterações da estabilidade das partículas provoca uma perda dos nutrientes retidos nos sedimentos (Helvey *et al.*, 1985; Thomas *et al.*, 1999).

Os nutrientes encontram-se no solo tanto no material mineral como na matéria orgânica. Esta última desempenha um papel importante na prevenção da perda dos nutrientes do solo, por lixiviação. Os nutrientes estudados neste trabalho são iões de carga positiva - catiões, sendo estes adsorvidos na superfície das partículas minerais e orgânicas (húmus) que possuem carga negativa (Neary *et al.*, 2005). Sendo assim, o incêndio provoca um aumento na perda dos nutrientes, ao destruir grandes quantidades de matéria orgânica presente no solo, que atuam como zonas de reserva, impedindo assim que estes fossem perdidos por erosão hídrica.

O primeiro período após um incêndio é caracterizado por perdas elevadas de sedimentos ricos em nutrientes. Estas perdas estão associadas principalmente à camada superficial de cinzas, rica em nutrientes, e sedimentos pertencentes ao horizonte A (Ferreira *et al.*, 2005).

Vários trabalhos têm sido realizados na quantificação da mobilização dos nutrientes após incêndio. Nomeadamente, na quantificação dos nutrientes no solo (Yildiz *et al.*, 2010), nos sedimentos mobilizados (Thomas *et al.*, 1999), na camada superficial de manta morta (Kutiel e Naveh, 1987; Trabaud, 1994; Johnson *et al.*, 2007). São poucos os estudos (Thomas *et al.*, 2000b; Ferreira *et al.*, 2005) realizados no âmbito da determinação por escorrência e ao longo de um período de monitorização. Estes estudos focam-se sobretudo na perda de nutrientes na forma permutável e dissolvida. No entanto, a quantificação total dos nutrientes perdidos neste processo tem sido pouco explorada.

O presente trabalho apresenta um estudo sobre os efeitos de um incêndio florestal na mobilização temporal dos nutrientes por escorrência durante os primeiros 6 meses após o incêndio, à escala de microparcela bem como à escala de encosta. São também avaliados, à escala de encosta, os efeitos da geologia e do tipo de uso florestal do solo na perda dos nutrientes sódio, potássio, cálcio e magnésio (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} ,

respectivamente), assim como estudar a relação das perdas destes nutrientes com os processos hidrológicos e erosivos inerentes a um incêndio.

2.4 Área de estudo

A área de estudo localiza-se na localidade de Ermida, concelho de Sever do Vouga (vide Figura 3), e foi selecionada devido à ocorrência de um incêndio florestal a 26 de Julho de 2010 que consumiu 295 hectares (AFN, 2010), sendo de severidade moderada. A área está inserida na Bacia hidrográfica do Rio Vouga, situando-se a Norte do rio Vouga, (40°43'N, 8°20'O). O clima da área é mesotérmico (temperado) húmido, com uma estação seca no Verão, o qual é moderadamente quente mas extenso (classificado como CSb, Köppen (1936)) (DRA – Centro, 2002). A temperatura média anual é de 14,9°C (estação de Barragem de Castelo Borgães, 13 km a Norte da área de estudo, a 306 m de altitude), enquanto a precipitação média anual é de 1609 mm (estação udométrica de Ribeiradio, localizada a 4,5 km a Este da área de estudo e a 228 m de altitude) (SNIRH, 2011). A vegetação arbórea predominante da área de estudo é constituída por *Eucalyptus globulus* e *Pinus pinaster*.

Os solos da área de estudo são predominantemente Cambisol e Leptosol Húmicos (WRB, 2006), e possuem uma textura variável (vide Tabela 1) (SSS, 1975) e com a rocha mãe de granito ou xisto (vide Tabela 1).

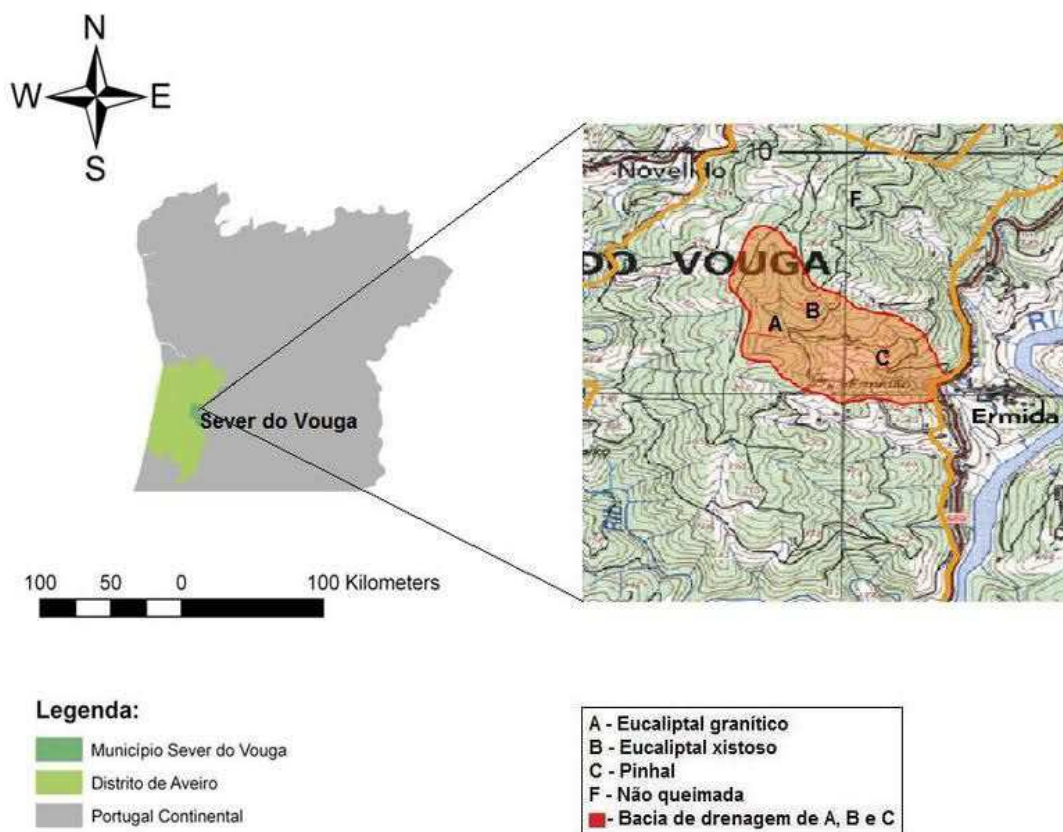


Figura 3 - Área de estudo

2.5 Material e métodos

2.5.1 Desenho experimental

Com o objectivo de estudar os efeitos de um incêndio florestal na mobilização dos nutrientes do solo foi monitorizada a área de estudo nos primeiros 6 meses, logo após o incêndio. O período de amostragem foi condicionado pelo desmantelamento de algumas encostas da área de estudo, devido a um processo de reflorestação que implicou a construção de terraços nas encostas. Foram escolhidas quatro encostas na área de estudo, tendo em conta o declive e a vegetação de cada uma. A encosta **Eucaliptal granítico**, área queimada (designada por “A” na Figura 3), foi escolhida pelo seu declive acentuado ($25,6^\circ \pm 4,4$) e por ter como vegetação predominante o eucalipto *Eucalyptus globulus*, e a encosta **Eucaliptal xistoso**, área queimada (designada por “B” na Figura 3), com características semelhantes à anterior, foi seleccionada para efeitos de

comparação com a primeira, com um declive ($24^{\circ} \pm 6,0$). A encosta **Pinhal**, área queimada (designada por “C” na Figura 3), encontra-se na base da bacia (declive $24^{\circ} \pm 2,4$) e por ser uma área de pinhal (*Pinus pinaster*) foi selecionada para o presente estudo. Por fim, selecionou-se a encosta **Não queimado**, área não queimada (designada por “F” na Figura 3), próxima à área ardida, e com o mesmo declive acentuado ($25^{\circ} \pm 3,5$), para efeitos de controlo.

A escorrência superficial e as perdas de nutrientes associadas foram estudadas através de três microparcels (BP – “Bounded Plot”) e quatro parcelas a nível de escala de encosta (OP – “Open Plot”), implantadas em cada uma das três encostas queimadas, sendo que na encosta Não queimado apenas foram implantadas as quatro OP. Cada microparcela foi montada com chapa de zinco e com uma área projetada de 0,5 m x 0,5 m (0,25 m²), com declives semelhantes entre si (vide Figura 4a). As parcelas abertas permitem obter os dados a nível de escala de encosta, tendo como áreas 2m x 77m, 2 m x 48 m, 2,36 m x 35,5 m e 2 m x 25 m, a encosta de Eucaliptal granítico, Eucaliptal xistoso, Pinhal e Não queimado, respectivamente (vide Figura 4b). Todas as parcelas estão conectadas por mangueiras a tanques de 30 L e 70 L, dependendo da escala da parcela. A considerar a eventual existência de transbordo de escorrência com a implementação de um só tanque, optou-se por colocar tanques em série conectados por mangueiras.

A precipitação total e a sua intensidade foram monitorizadas através de quatro pluviómetros totalizadores e três pluviómetros automáticos distribuídos pela área de estudo. O total de precipitação ao longo do ano de monitorização foi de 1484 mm, estando este valor abaixo da média de precipitação anual dos últimos 20 anos. Durante o período de amostragem perdeu-se o segundo maior evento de precipitação (162 mm) que ocorreu a 03/11/2010, devido a problemas logísticos. Associada a esta perda, em Novembro de 2010 foram selecionados os restantes três períodos de amostragem, para que não existisse uma grande falha temporal entre os eventos analisados.



(a)



(b)

Figura 4 - Parcelas da área de estudo. (a) microparcelas; (b) parcelas abertas.

A partir de 25 de Agosto de 2010, a medição de escorrência, retida nos tanques, e a recolha de amostras, foi realizada periodicamente, em intervalos de 1 a 2 semanas, dependendo da ocorrência de precipitação. Nestas ocasiões, também a chuva acumulada nos udómetros totalizadores foi medido. As amostras foram recolhidas em garrafas de 0,5 L de polietileno, previamente lavadas com ácido clorídrico ($\text{pH} < 2$) e água destilada. Por razões logísticas, só se recolheu amostras dos tanques diretamente ligadas às parcelas e não dos eventuais tanques subsequentes. Após a recolha, as amostras foram colocadas em arcas térmicas e transportadas para o laboratório, onde foram armazenadas no frio ($4\text{ }^{\circ}\text{C}$).

A amostragem do solo foi feita logo após o fogo, em 10 de Agosto de 2010, e repetido ao fim deste estudo, em 23 de Fevereiro de 2011. Em ambos os casos, cinco pontos de amostragem foram selecionados, de forma equidistante, ao longo de um transecto desde a base até o topo de encosta, de modo a conseguir-se uma caracterização global da encosta. Em cada ponto, as cinzas foram recolhidas da superfície de uma parcela de 50 cm^2 (mas só em Agosto 2010), enquanto os primeiros dois centímetros do solo foram recolhidas numa subparcela de 25 cm^2 . Após transporte para o laboratório, as amostras de cinzas e solo foram imediatamente secas ao ar e, posteriormente, guardadas.

Tabela 1 - Características gerais das encostas estudadas.

	Eucaliptal granítico	Eucaliptal xistoso	Pinhal	Não Queimado
Espécie florestal predominante	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Pinus pinaster</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>
Coordenadas	40°43'N	40°43'N	40°43'N	40°44'N
	8°21'O	8°20'O	8°20'O	8°20'O
Altitude (m)	222	223	151	257
Declive	25,6°±4,4	24°±6,0	24°±2,4	25°±3,5
Comprimento	77	48	35,5	25
Densidade aparente	0,71 ± 0,11	0,78 ± 0,19	0,73 ± 0,13	0,88 ± 0,19
Textura [0-2] cm	Franco-arenoso	Franco	Franco-argilo-arenoso	-
Areia (%)	61,3	44,7	53,6	-
Limo (%)	24,3	33,8	25,1	-
Argila (%)	14,4	21,5	21,3	-
Área das encostas (m ²)	154	96	83,78	50

2.5.2 Amostras de escurrência

No laboratório, 100 mL de cada amostra foi transferida para garrafas de polietileno previamente lavadas com ácido nítrico, pH<2, e água destilada, e subsequentemente acidificada com ácido nítrico para pH<2 e armazenada no frio (4 °C) , de acordo com o protocolo 1060 APHA (1999), tendo o prazo máximo de armazenamento de 6 meses. O tratamento das amostras de escurrência envolveu a digestão com ácido nítrico e ácido sulfúrico, segundo o protocolo 3030 G de APHA (1999), usando material de teflon. A digestão ocorreu em banhos de areia a uma temperatura de 250°C. O método de análise usado para a determinação das concentrações dos nutrientes está descrito na Tabela 2. A determinação da perda de sedimentos, nas amostras de escurrência, realizou-se pelo método 2540 D- Sólidos Suspensos Totais (SST) (APHA,1999).

Por uma questão de tempo disponível não foram analisadas todas as amostras de escurrência recolhidas mas “somente” as amostras correspondentes aos dois maiores eventos de precipitação de cada mês entre Agosto 2010 e Fevereiro 2011, i.e. os primeiros seis meses após fogo, contabilizando um total de 282 amostras de escurrência.

A massa de nutrientes mobilizada pela escorrência, é calculada através da seguinte equação:

$$m_i \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^2} \right] = \frac{C_i \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right] \times V_{\text{escorrência}} [\text{L}]}{A_{\text{parcela}} [\text{m}^2]} \quad (1)$$

Onde m_i e C_i correspondem, respectivamente, à massa mobilizada e à concentração nas amostras de escorrência, do nutriente i ; $V_{\text{escorrência}}$ é o volume de escorrência entre datas de amostragem e A_{parcela} a área da parcela (microparcela ou encosta).

Tabela 2 - Métodos de análise para a determinação das concentrações dos quatro nutrientes.

Nutriente	Método	Comprimento de onda [nm]	Gama dos padrões [mg/L]
Sódio (Na^+)	FEC	589,0	0,2 – 1,2
Potássio (K^+)	FEC	766,5	0,4 – 2,4
Cálcio (Ca^{2+})	EAA	422,7	0,4 – 2,4
Magnésio (Mg^{2+})	EAA	285,2	0,1 – 0,6

2.5.3 Amostras de solo

As amostras de solo para a caracterização a nível de nutrientes, foram recolhidas em duas datas distintas, uma no início da monitorização da área de estudo e outra próxima da data da última recolha das amostras de escorrência, Agosto de 2010 e Fevereiro de 2011, respectivamente, sendo posteriormente secas ao ar e analisadas.

As cinzas foram recolhidas apenas para a primeira data de amostragem e posteriormente foram secas ao ar. Para a análise aos nutrientes, efetuou-se uma amostra composta dos cinco pontos tendo sido realizadas três réplicas para cada encosta.

Tanto as amostras de cinzas como de solo foram sujeitas a digestões ácidas segundo o protocolo 3030 G de APHA (1999); e analisadas no que diz respeito à concentração dos nutrientes através dos métodos indicados na Tabela 2.

Para a caracterização do solo das diferentes encostas (vide Tabela 1) recolheram-se amostras de três pontos ao longo de cada encosta, efetuaram-se análises de textura através do método internacional da análise mecânica e a sua caracterização foi realizada segundo os critérios de USDA, e determinou-se a respectiva densidade do solo.

2.6 Resultados

2.6.1 Nutrientes no solo e nas cinzas

Os resultados de concentração de nutrientes obtidos nas amostras de solo e de cinzas, recolhidas no início e no final do período de amostragem, encontram-se resumidos na Tabela 3. O solo de 0-2 cm de profundidade, das quatro encostas em estudo, apresenta uma constituição semelhante em termos dos teores dos quatro nutrientes. No entanto, na encosta Não queimado, a concentração de Ca é cerca de 10% relativamente às restantes encostas. A maior concentração de Mg no solo observa-se na encosta Eucaliptal granítico, sendo a diferença aproximadamente de 50% comparativamente às restantes encostas. O K é o nutriente que se encontra em maior quantidade, enquanto o Na é minoritário.

Entre os dois momentos de amostragem, não se denota uma variação relevante em termos das concentrações no solo dos nutrientes analisados. No caso do Ca observa-se um aumento da sua concentração entre a amostragem inicial e a final, em todas as encostas.

Tabela 3 - Concentrações médias de nutrientes nas cinzas (g/kg) e no solo superficial (0-2 cm: g/kg) durante o primeiro e sexto mês pós-fogo.

Encosta	Amostragem		Na	K	Ca	Mg
Eucaliptal granítico	Inicial	Cinzas	1,96	7,77	14,91	3,83
		Solo	0,67	10,83	1,37	1,16
	Final	Solo	0,65	11,30	2,02	1,02
Eucaliptal xistoso	Inicial	Cinzas	1,21	8,41	12,51	2,79
		Solo	0,63	10,30	1,14	0,72
	Final	Solo	0,50	9,78	2,18	0,64
Pinhal	Inicial	Cinzas	1,94	9,40	22,78	4,04
		Solo	0,76	12,75	1,25	0,87
	Final	Solo	0,65	11,70	2,23	0,90
Não queimado	Inicial	Solo	0,67	11,86	0,13	0,67
	Final	Solo	0,62	10,12	0,42	0,54

n=5; amostragem inicial: Agosto de 2010; amostragem final: Fevereiro de 2011

As cinzas possuem quantidades elevadas de Ca em comparação com o solo analisado. Na encosta Pinhal a concentração deste elemento nas cinzas chega a ser 10 e 18 vezes superior ao encontrado no solo, para a amostragem final e inicial, respectivamente. Em contrapartida, as concentrações de K nas cinzas são sempre inferiores (cerca de 20%) às registadas no respectivo solo.

De todas as encostas queimadas, a encosta Pinhal é a que apresenta valores mais elevados de concentração de nutrientes nas cinzas, excepto para o Na, que é mais abundante nas cinzas da encosta Eucaliptal granítico (1,96 g/kg).

2.6.2 Valores globais de escurência e perdas de nutrientes e sedimentos

Na Tabela 4 e Tabela 5, encontram-se resumidos os valores do coeficiente de escurência médio, da perda total de sedimentos e perda total de nutrientes, para cada encosta, à escala de microparcela e de encosta, no período de amostragem deste estudo.

Na escala de microparela, a encosta Eucaliptal xistoso possui o coeficiente de escurência médio mais elevado (33%) e as maiores perdas de sedimentos (1993 kg/ha)

e nutrientes. A encosta de Eucaliptal granítico, embora possua as menores perdas de sedimentos (510 kg/ha), assim como de K e Ca, apresenta, em relação ao Pinhal, uma maior mobilização ao nível do Na e do Mg.

O K é o nutriente mais mobilizado em qualquer uma das encostas estudadas, à escala de microparcela e encosta, em oposição ao Mg, que o elemento que menor mobilização sofre.

Tabela 4 - *Escorrência superficial e perda de nutrientes e sedimentos nas microparcelas das encostas queimadas durante os primeiros seis meses após o incêndio.*

Encosta	Coeficiente de Escorrência [%]	Perda de sedimentos [kg/ha]	Perda de nutrientes [mg/m ²]			
			Na	K	Ca	Mg
Eucaliptal granítico	24	510	1194	1520	724	553
Eucaliptal xistoso	33	1993	1891	5537	2542	1695
Pinhal	22	847	877	1628	1156	390

Tabela 5 - *Escorrência superficial e mobilização de nutrientes e sedimentos nas parcelas de encosta, das quatro encostas de estudo durante os primeiros seis meses após o incêndio.*

Encosta	Coeficiente de escorrência [%]	Perda de sedimentos [kg/ha]	Perda de nutrientes [mg/m ²]			
			Na	K	Ca	Mg
Eucaliptal granítico	1,5	626	85,7	481,7	135,7	85,6
Eucaliptal xistoso	0,9	65,9	47,0	101,5	49,9	25,5
Pinhal	1,1	35,9	49,6	89,0	49,2	28,4
Não Queimado	1,4	8,0	37,2	36,3	18,2	5,4

À escala de encosta, o maior coeficiente de escorrência médio observa-se na encosta de Eucaliptal granítico (1,5%), assim como a maior perda de sedimentos (626 kg/ha) e nutrientes. A encosta Não queimado, por sua vez, apresenta as menores perdas de nutrientes e sedimentos (7,99 kg/ha), todavia não possui o menor coeficiente de escorrência médio (1,4%).

A perda de sedimentos na encosta Eucaliptal xistoso é 2 vezes superior à registada na encosta de Pinhal. Porém, esta última possui um menor coeficiente de escorrência médio (0,9%). As perdas de nutrientes nestas encostas não diferem muito entre si.

À semelhança do que se observou à escala de microparcela, à escala de encosta o K é nutriente que sofre maiores perdas, nas encostas queimadas. Na encosta Não queimado, o Na apresenta valores ligeiramente superiores aos do K (37,2 e 36,3 mg/m², respectivamente).

Observam-se visíveis diferenças entre escalas para os três parâmetros (coeficiente de escorrência, perda de sedimentos e perda de nutrientes), registando-se valores mais elevados à escala de microparcela, excepto na encosta Eucaliptal granítico, onde a perda de sedimentos é superior à escala de encosta.

2.6.3 Variação temporal da mobilização de nutrientes

2.6.3.1 Concentração de nutrientes nas amostras de escorrência

A evolução temporal da concentração de nutrientes nas amostras de escorrência analisadas, encontra-se representada na Figura 5 e Figura 6, para a escala de microparcela e encosta, respectivamente.

À escala de encosta, os valores de concentração nas amostras de escorrência apresentam uma maior variabilidade temporal, comparativamente à escala de microparcela. Em ambas as escalas observam-se inicialmente concentrações de nutrientes elevadas, no entanto nas microparcelas existe uma drástica diminuição dos valores de concentração que se mantêm reduzidos no restante período de amostragem. À escala de encosta, essa diminuição não é tão pronunciada, ocorrendo vários picos de concentração nas várias encostas, por vezes superiores aos valores obtidos na primeira amostragem.

Escala: microparcela

As maiores concentrações de nutrientes mobilizados por escorrência nas microparcelas registam-se no primeiro evento de chuva, i.e., na primeira amostragem, para todos os nutrientes e para todas as encostas queimadas. Após este primeiro evento, os valores tendem a variar pouco ao longo do restante período de amostragem.

Na encosta Eucaliptal xistoso observam-se os valores mais elevados de concentração de nutrientes nas amostras de escorrência. Nesta encosta registam-se pontualmente pequenos picos, mas nunca da mesma ordem de grandeza dos valores do primeiro evento. As encostas Eucaliptal granítico e Pinhal apresentam geralmente uma tendência semelhante, excepto no caso do Ca.

Para o Na, as três encostas têm uma tendência similar, e após o pico de 10/11/2010, os valores de concentração são bastante aproximados. A última data de amostragem caracteriza-se por um novo pico de concentração. O K apresenta os valores de concentração mais elevados, sendo portanto o nutriente mais mobilizado no decorrer do período de monitorização, o que está de acordo com os valores previamente apresentados na Tabela 4.

Escala: microparcela

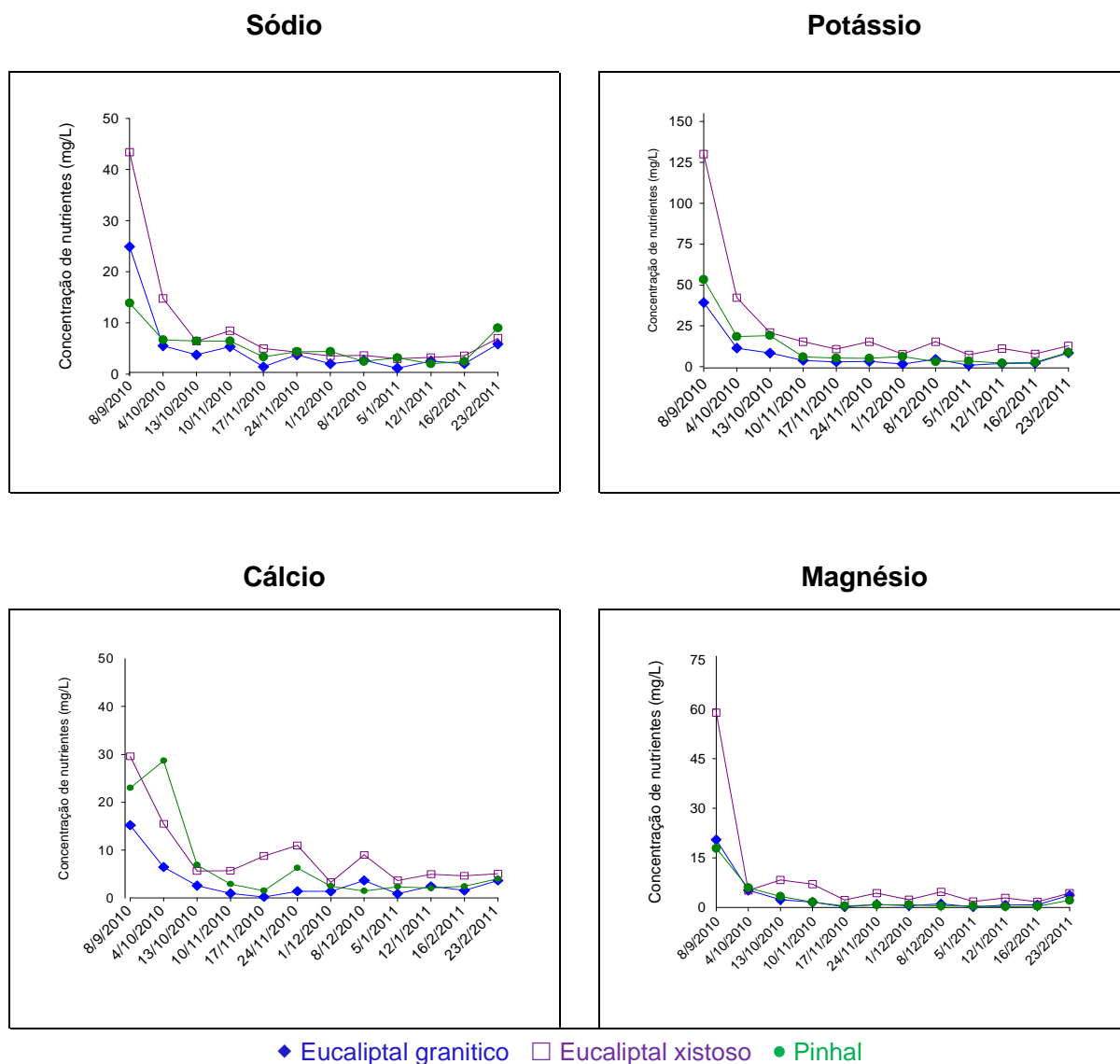


Figura 5 - Concentração de nutrientes, em amostras de escorrência, nas microparcelas nas diferentes encostas.

O Ca apresenta concentrações temporalmente irregulares nas três encostas, no período compreendido entre 13/10/2010 e 5/1/2011. Após este intervalo, as encostas seguem uma tendência semelhante. Na encosta Pinhal as concentrações mais elevadas ocorrem na segunda data de amostragem (28,7 mg/L). A evolução temporal da mobilização de Mg pela escorrência tem um comportamento semelhante ao do K, apresentando, no entanto, as concentrações numa gama mais reduzida.

Escala: encosta

À escala de encosta (vide Figura 6) existe uma grande variabilidade temporal entre encostas. Assim como para as microparcelas, o K é o nutriente mais mobilizado. Pontualmente observam-se picos de concentração dos diferentes nutrientes, estando os picos mais elevados normalmente associados à encosta Eucaliptal granítico. De um modo geral, a encosta Não queimado apresenta os menores valores de concentração de nutrientes nas amostras de escorrência.

Para o Na, as encostas seguem, de uma forma geral, uma tendência semelhante durante todo o período de amostragem. As maiores perdas ocorrem na encosta Pinhal, no período compreendido entre a primeira amostragem e a de 17/11/2010. Após essa data, na encosta Eucaliptal granítico observam-se os dois maiores picos de concentração em 8/12/2010 (11 mg/L) e na última amostragem (12.6 mg/L). As restantes encostas apresentam igualmente um pico na última amostragem. O K apresenta o maior pico de concentração, na data 8/12/2010 com 142 mg/L. Nas encostas Eucaliptal xistoso e Não queimado, verificam-se valores relativamente constantes ao longo do tempo.

Escala: encosta

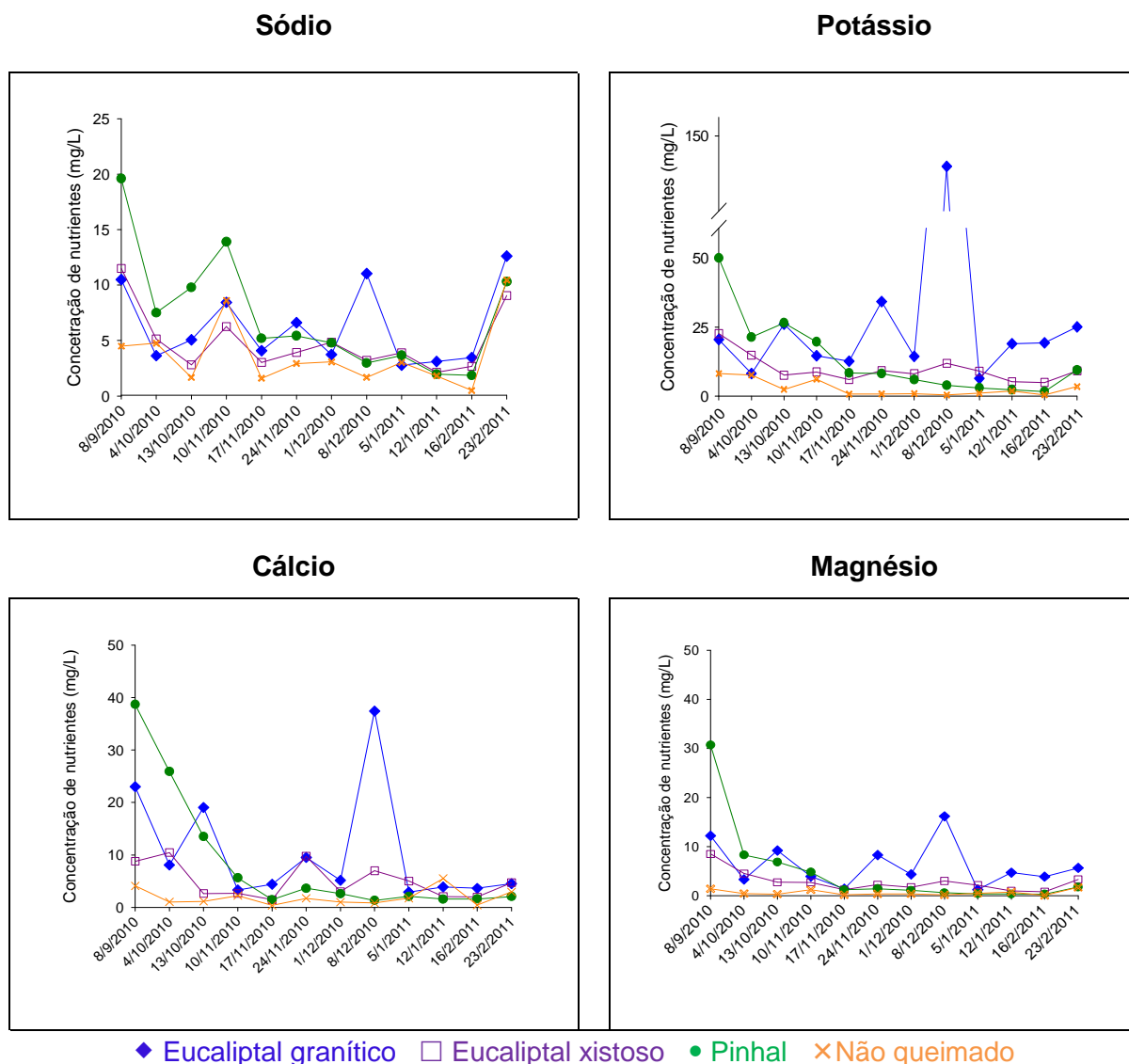


Figura 6 - Concentração de nutrientes, em amostras de escorrência, nas parcelas abertas nas diferentes encostas.

Nas amostras de escorrência da encosta Pinhal, observam-se concentrações de Ca mais elevadas no primeiro evento, registrando-se posteriormente uma diminuição até à amostragem de 17/11/2010. A partir desta data, as concentrações deste nutriente mantêm valores reduzidos até ao final do período de amostragem. Na encosta Eucaliptal granítico a evolução temporal de Ca na escorrência é muito mais irregular, ocorrendo o maior pico de concentração na data de 8/12/2010 com 37,4 mg/L.

O comportamento da curva do Mg é muito semelhante à do K, apresentando os picos de concentração nas mesmas datas. Para a encosta Eucaliptal granítico, o maior pico ocorre

a 8/12/2010 com 16,2mg/L e a partir da amostragem de 5/1/2011, a concentração aumenta até à última amostragem.

2.6.3.2 *Massa de nutrientes mobilizada*

A evolução temporal da mobilização dos nutrientes (mg/m^2) por escorrência, no decorrer do período de amostragem é ilustrada nas Figura 7 e Figura 8 para as escalas de microparcela e de encosta, respectivamente.

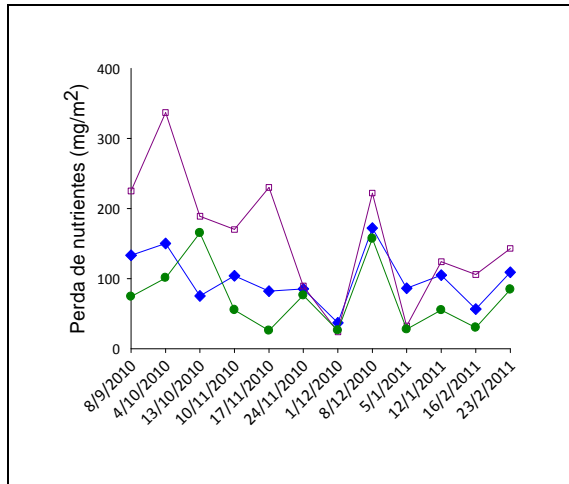
À escala de microparcela, as perdas mássicas de nutrientes apresentam uma maior variação temporal, quando comparadas com as concentrações nas amostras de escorrência. Enquanto as maiores concentrações registam-se no primeiro evento, as perdas mássicas mais elevadas surgem ao longo do período de amostragem, com picos bem definidos.

De um modo geral, em cada evento, a perda de nutrientes nas microparcelas é maior na encosta de Eucaliptal xistoso, em particular no caso do K, que é o nutriente mais mobilizado. Na Tabela 4 pode observar-se que esta encosta, apresenta igualmente o maior coeficiente de escorrência (33%) e maior perda total de sedimentos (1993 kg/ha). As encostas Eucaliptal granítico e Pinhal exibem uma variação temporal e magnitude semelhante, ao nível da mobilização de nutrientes.

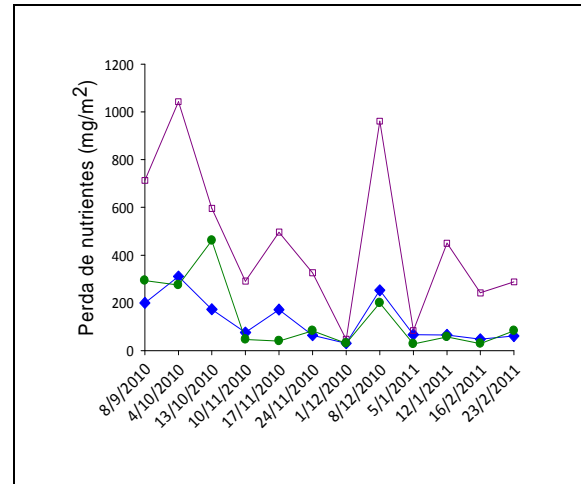
À escala de microparcela, na encosta Eucaliptal xistoso entre a primeira amostragem e a de 17/11/2010, verificam-se as maiores perdas de Na, comparativamente às restantes encostas. Após esta data, as perdas deste nutriente são semelhantes nas três encostas, sendo que apresentam diferenças menos acentuadas que no período precedente. É sempre na encosta Eucaliptal xistoso que se observa a maior mobilização de todos nutrientes, mas também a maior inconstância temporal das perdas. Nas primeiras três amostragens a mobilização do Ca nesta encosta equipara-se à de Pinhal.

Escala: microparcelas

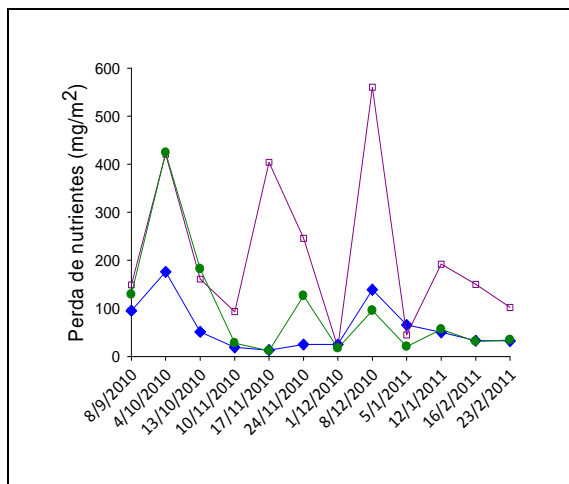
Sódio



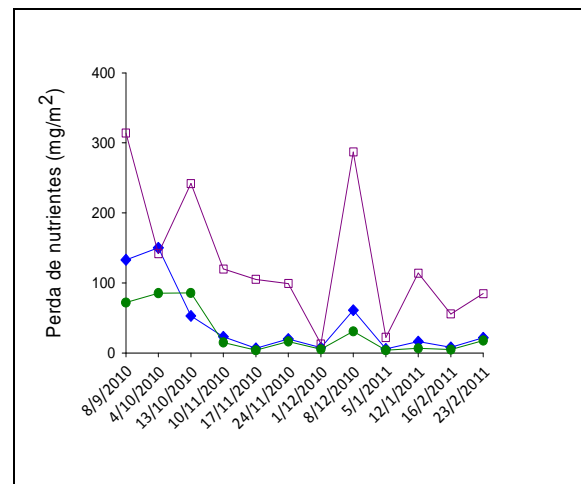
Potássio



Cálcio



Magnésio



◆ Eucaliptal granítico □ Eucaliptal xistoso ● Pinhal

Figura 7 - Mobilização de nutrientes, em amostras de escorrência, nas microparcelas nas diferentes encostas.

Escala: encosta

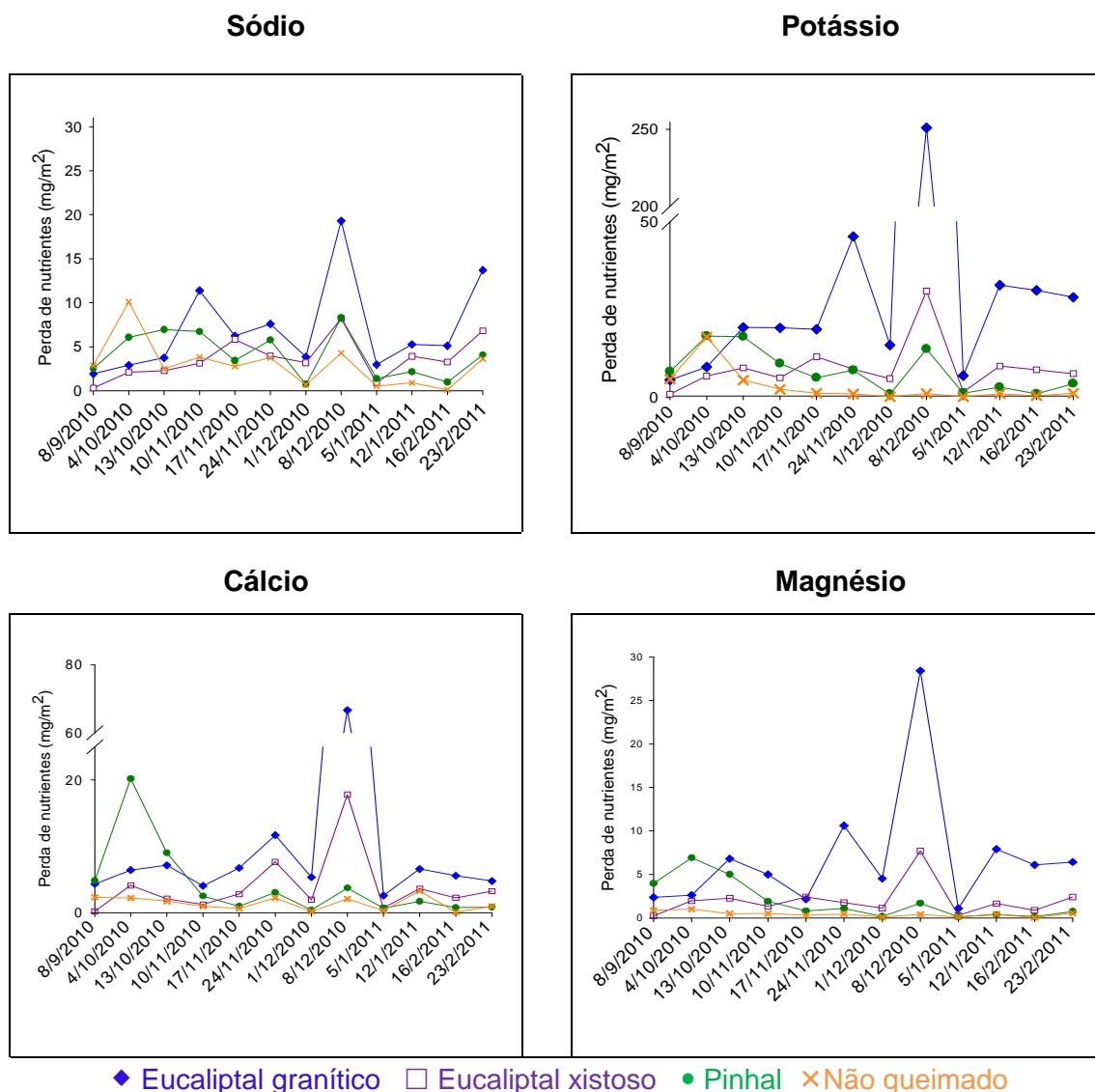


Figura 8 - Mobilização de nutrientes, em amostras de escorrência, nas parcelas de encosta nas diferentes encostas.

À escala de encosta, a de Eucalyptal granítico possui, de um modo geral, as maiores perdas de nutrientes e a Não queimado apresenta as menores, tal como acontece com as concentrações de nutrientes (vide Figura 6).

No caso do Na e K, é visível, na segunda data de amostragem, maiores perdas mássicas na encosta Não queimado. Todas as encostas têm um pico comum a 08/12/2010. Após esta data, os nutrientes K, Ca e Mg assumem comportamentos semelhantes. Para o Ca e Mg, a ocorrência de maiores perdas na encosta de Pinhal é apenas evidente numa fase inicial.

2.6.3.3 *Evolução temporal dos factores que influenciam a perda de nutrientes*

No presente trabalho, os factores estudados que influenciam a perda de nutrientes são: precipitação, intensidade de precipitação (I_{30}), escorrência e perda de sedimentos.

O total de precipitação no período de monitorização (6 meses) foi de 1266,22mm, dos quais 962mm correspondem aos eventos analisados neste trabalho, correspondendo portanto a cerca de 76%. Desde a data do incêndio até à primeira amostragem não ocorreram eventos de chuva relevantes.

A Figura 9 e a Figura 10 apresentam a evolução temporal da precipitação e escorrência às escalas de microparcels e de encosta, respectivamente. Os picos de escorrência às duas escalas correspondem geralmente aos picos de precipitação. Denota-se uma relação entre variação das perdas mássicas de nutrientes, escorrência, precipitação e intensidade, i.e., quanto maior a escorrência, precipitação e intensidade, maiores as perdas de nutrientes, nomeadamente nas datas de 17/11/2010, 08/12/2010, 12/01/2011. São exceções os eventos correspondentes às duas últimas amostragens.

O elevado coeficiente de escorrência, apresentado na Tabela 4, para a encosta Eucaliptal xistoso é reflectido na variação deste parâmetro ao longo do período de amostragem (vide Figura 9), igualmente associado a maiores concentrações e perdas de nutrientes (vide Figura 5 e Figura 7).

À escala de encosta, a escorrência começa por ter valores mais elevados na Não queimado (vide Figura 10) até 13/10/2010. Estes elevados valores são reflectidos na perda dos nutrientes Na e K, para este mesmo período (vide Figura 8). Após esta data, a escorrência nas encostas Eucaliptal xistoso, Pinhal e Não queimado apresenta variações semelhantes.

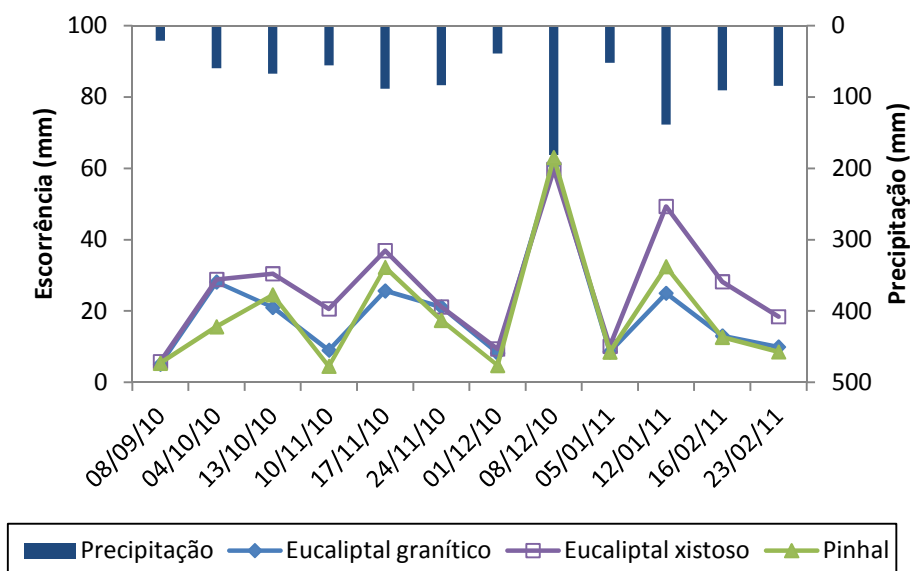


Figura 9 - Evolução temporal da precipitação e escoância, nas microparcelas das encostas estudadas.

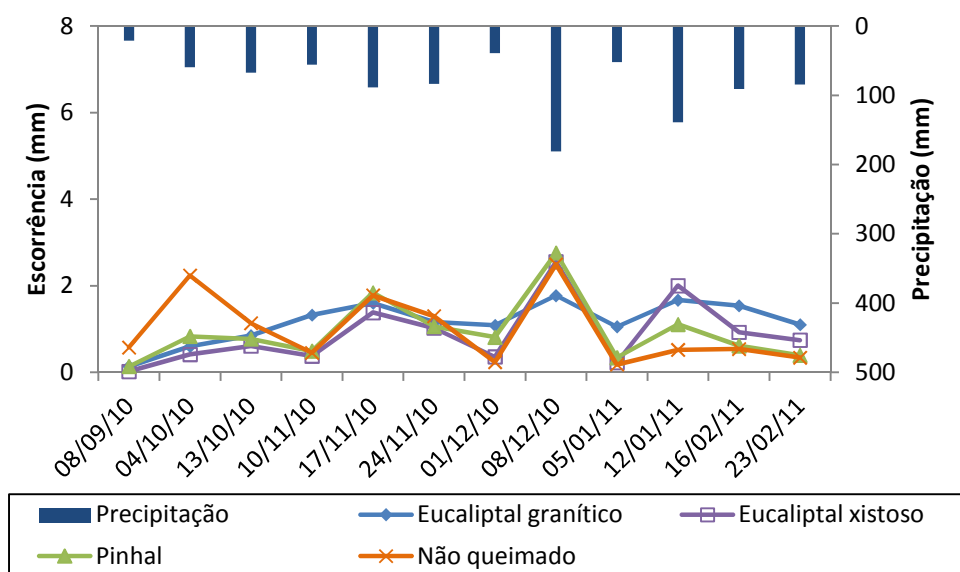


Figura 10 - Evolução temporal da precipitação e escoância, nas parcelas abertas das encostas estudadas.

As perdas de sedimentos, ao longo do período de monitorização, estão representadas na Figura 11 e Figura 12. As referidas perdas seguem o mesmo padrão que a perda total de sedimentos, em ambas as escalas: microparcela e encosta (vide Tabela 4), i.e., maiores perdas na encosta Eucaliptal xistoso à escala de microparcela e na Eucaliptal granítico à escala de encosta. Entre a primeira e segunda amostragem, as microparcelas das

encostas queimadas, apresentam quantidades semelhantes de perda de sedimentos. A 13/10/2010, observa-se um pico de perda de sedimentos na encosta Pinhal, sendo que este apenas corresponde a um pico de perda mássica para todos os nutrientes nesta encosta, excepto para o Ca, possuindo no entanto um valor elevado, nesta mesma data (vide Figura 7).

À escala de encosta, a perda de sedimentos na encosta Não queimado, é mais reduzida, comparativamente às outras três encostas. O mesmo se verifica com a perda de nutrientes, à mesma escala (vide Tabela 5)

Existe um pico de perda de sedimentos na encosta de Pinhal, associado a um pico de perda de nutrientes, no segundo evento (vide Figura 8).

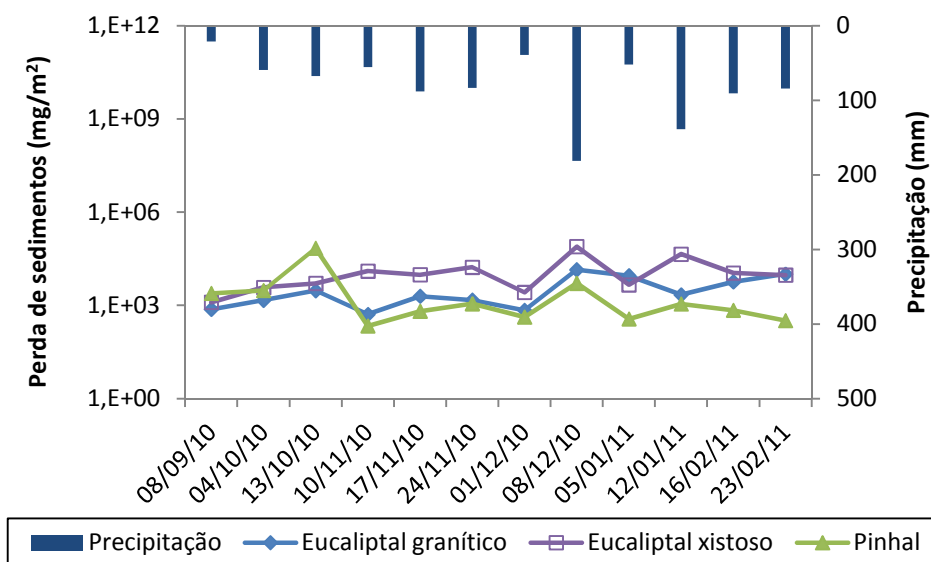


Figura 11 - Evolução temporal da precipitação e perda de sedimentos, nas microparcelas das encostas estudadas.

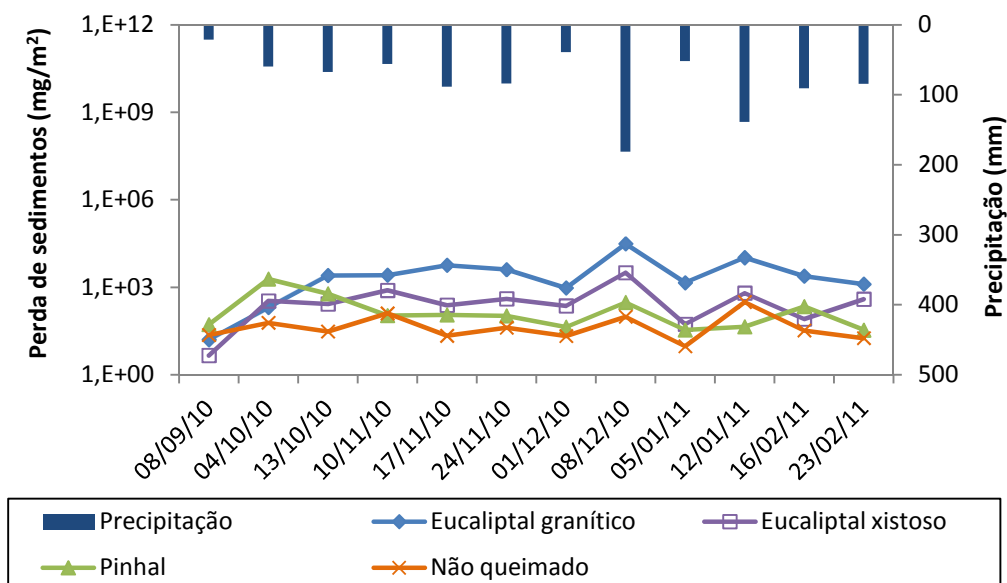


Figura 12 - Evolução temporal da precipitação e perda de sedimentos, nas parcelas abertas das encostas estudadas.

Geralmente, associados a grandes eventos de precipitação vêm os picos de intensidade. Esta tendência observa-se principalmente nos primeiros meses de amostragem (vide Figura 13). O evento em que se regista o valor mais elevado de intensidade (26,7 mm/h), corresponde ao maior valor de precipitação (181,14mm) e perda de sedimentos (vide Figura 11 e Figura 12).

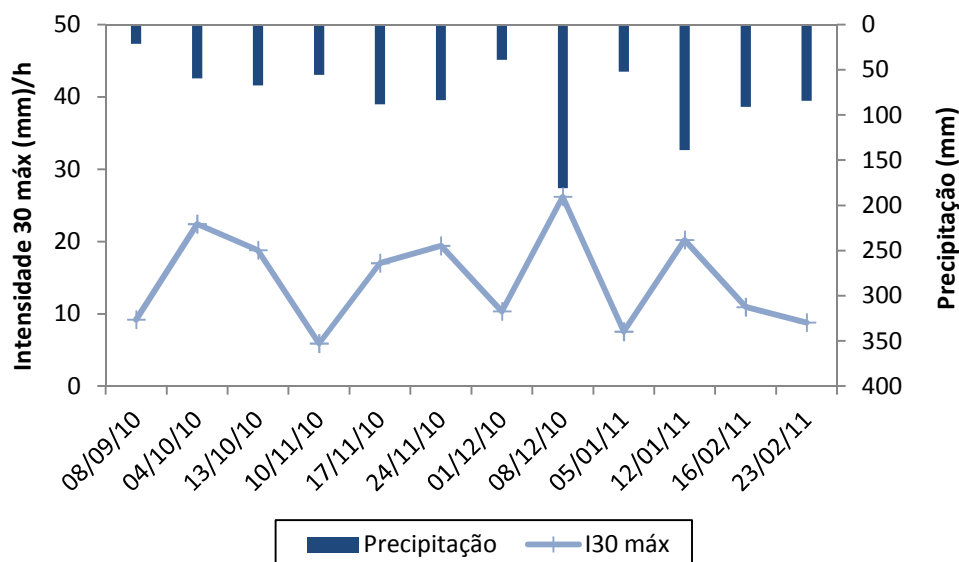


Figura 13 - Evolução temporal da precipitação e intensidade máxima em 30 minutos.

À escala de microparcela, as perdas de nutrientes e os valores de intensidade máxima em 30 minutos (volume máximo de chuva em 30 minutos, e convertido para mm/h) apresentam a mesma tendência apenas na encosta Eucaliptal xistoso e para os nutrientes Na, o K e o Ca (vide Figura 7 e Figura 13). Para as restantes encostas, os picos e os mínimos de perda de nutrientes não coincidem com os de intensidade.

Após o evento de 08/12/2010, que assume os valores mais elevados de escorrência, de intensidade e de perda de sedimentos as encostas assumem de forma geral, comportamentos semelhantes, para estes parâmetros e na mobilização de nutrientes, a nível de escala de encostas.

2.7 Discussão

Na caracterização do solo da área de estudo verifica-se que, a nível dos teores de nutrientes, as diferentes encostas possuem valores semelhantes. Os resultados obtidos sugerem que os principais factores estudados no presente estudo – geologia (granito e xisto), tipo de uso florestal (eucalipto e pinheiro) e ocorrência de incêndio, não assumem um papel importante no impacto nos nutrientes no solo de profundidade de 0-2 cm. Nas cinzas foram encontradas maiores quantidades de Ca na encosta Pinhal. Nas encostas Eucaliptal granítico e Eucaliptal xistoso esses valores são 1,5 vezes e 1,8 vezes menores, respectivamente, em relação à de Pinhal.

Enquanto o solo apresenta quantidades mais elevadas de K, nas cinzas é o Ca o nutriente mais abundante. Assim como o encontrado por Khanna *et al.* (1994), para a quantidade total de nutrientes nas cinzas de eucalipto e Ferreira *et al.* (2005) para a fracção permutável nas cinzas de pinhal, a camada superficial de cinza é rica em nutrientes, principalmente em Ca. Todavia, enquanto o presente estudo tem a seguinte ordem de abundância de nutrientes nas cinzas: Ca>K>Mg>Na em ambos os estudos anteriormente citados, as quantidades de Mg foram superiores ao K, i.e. obedece à mesma ordem, com exceção do K e Mg.

Num estudo sobre decomposição do “litter” de *Eucalyptus globulus*, na região centro de Portugal, Ribeiro *et al.* (2002) obtiveram resultados semelhantes aos encontrados no presente estudo, para as cinzas em termos de Ca, 16,5 mg.g⁻¹. Este resultado, sugere que as quantidades elevadas de Ca nas cinzas podem ter origem na manta de “litter”, existente nas encostas de eucalipto antes da ocorrência do incêndio. Segundo Nunes *et al.* (2010) a caruma existente no solo possui também elevados valores de Ca,

justificando assim as quantidades elevadas deste elemento (22,78 g/kg) nas cinzas da encosta de Pinhal. Relativamente aos restantes nutrientes, ambos os estudos obtiveram valores que diferem bastante dos encontrados neste trabalho. Uma hipotética explicação para os valores elevados de K observado nas cinzas será uma contaminação por parte do solo (rico neste elemento) i.e., aquando a recolha da camada de cinzas, poder-se-á ter também recolhido, acidentalmente, alguma quantidade de solo. Entre o início e fim do período de amostragem, existiu um aumento no teor de Ca no solo, para todas as encostas. Para as encostas queimadas, esse aumento poderia ser devido a um transporte deste nutriente da camada de cinzas para o solo superficial. No entanto, esta sugestão não explica a existência do mesmo comportamento na encosta Não queimado.

Os resultados obtidos mostram que após fogo existe uma maior perda de nutrientes, o que está de acordo com o encontrado por Ferreira *et al.* (2005) num período de 14 meses após incêndio, e por Thomas *et al.* (2000a, 2000b) para o segundo e terceiro ano de monitorização (após incêndio).

Ao comparar as perdas de nutrientes obtida na encosta queimada, Eucaliptal xistoso, na escala de encosta, com as da encosta Não queimado (que possui a mesma geologia e vegetação predominante) observa-se que a queimada possui uma maior mobilização dos nutrientes. Thomas *et al.* (2000b) observou para as encostas queimadas de eucalipto e pinheiro, perdas de nutrientes (na fracção dissolvida), na magnitude de uma a duas ordens superiores, que as perdas ocorridas nas encostas não queimadas. Neste estudo é claramente visível que nas encostas de eucaliptal queimadas, quanto maior é a perda de sedimentos maior é a perda de nutrientes. Para a encosta Pinhal, a relação anteriormente descrita não é tão visível. À escala de encosta, o Pinhal tem maior coeficiente de escorrência e possui cerca de metade da perda de sedimentos que a encosta Eucaliptal xistoso, no entanto as perdas de nutrientes encontram-se na mesma gama de valores.

À escala de microparcela, a encosta Pinhal, apesar de ter perdas de sedimentos mais elevadas em comparação com a encosta Eucaliptal granítico, nem sempre obteve maiores perdas de nutrientes, sendo menores no caso do Na e Mg. A relação perda de nutrientes vs. perda de sedimentos existe para o Ca e K, uma vez que ambos os nutrientes têm um elevado teor nos sedimentos arrastados. No caso do Ca, este está mais disponível nas cinzas e o K encontra-se em maior quantidade no solo. Já Thomas *et al.* (2000b) nas amostras de escorrência em parcelas de 16m², encontra de um modo geral, maiores perdas dos nutrientes K, Ca e Mg na forma dissolvida em

parcelas de eucaliptal (*Eucalyptus globulus*) do que em parcelas de pinhal (*Pinus pinaster*), embora os valores de escorrência sejam maiores no caso do pinhal.

A encosta Não queimado, por sua vez, tem perdas de sedimentos um pouco mais elevadas que a encosta de pinhal queimado, mas possui perdas de nutrientes menores. Este resultado sugere que as perdas, na primeira encosta, ocorrem sobretudo através da mobilização dos nutrientes na matéria orgânica e “litter”. No entanto, a mobilização dos nutrientes é reduzida e lenta, gerando poucas perdas nesta encosta. Em associação com o facto da existência da camada de cinzas nas áreas queimadas, rica em nutrientes e facilmente erodida (Ferreira *et al.*, 2005) os valores de nutrientes nas amostras de escorrência serão superiores nas encostas queimadas. Outra diferença para a elevada perda de nutrientes nas encostas queimadas em comparação à Não queimado é a existência de zonas com CTC na última encosta (a matéria orgânica tem uma elevada CTC), que têm a capacidade de adsorver os nutrientes que se encontram na forma solúvel retendo-os e assim impedindo a sua perda na escorrência. (Neary *et al.*, 2005).

O nutriente com maiores perdas por escorrência é o K para ambas as escalas, tanto para as encostas queimadas como para a Não queimado. Este resultado é contraditório ao encontrado por Thomas *et al.* (1999) nos sedimentos, e por Thomas *et al.* (2000b) e Ferreira *et al.* (2005) na escorrência, onde obtêm maiores perdas a nível de Ca. Todavia, as diferenças encontradas comparativamente aos estudos anteriormente referidos podem ser atribuídas ao facto destes estudos determinarem as concentrações da fracção solúvel e permutável dos nutrientes, enquanto o presente estudo em oposição determina as concentrações totais. Sendo assim e segundo refere Costa (2004) o K encontra-se no solo numa percentagem mínima na forma permutável (1 a 2%), enquanto o Mg e principalmente o Ca estão em maiores quantidades nesta forma, logo as amostras de escorrência terão um teor mais elevado de K na forma de total, uma vez que o solo deste estudo é rico neste nutriente. Se fosse determinada a fracção solúvel, os resultados encontrados poderiam ser mais similares aos estudos anteriormente referidos. Embora exista no solo de 0-2 cm, um maior teor de Mg em comparação com o Na, o Mg possui menores perdas, indicando que é um nutriente pouco mobilizado, o que está de acordo ao encontrado por Soto e Diaz-Fierros (1993), que obteve uma rápida mobilização para os nutrientes Na e K em comparação ao Ca e Mg.

A variação temporal dos nutrientes na mobilização da sua massa é determinada pela combinação dos efeitos da concentração de nutrientes e as quantidades de escorrência, sendo bem visível a correspondência entre escorrência e perda mássica de nutrientes.

Esta associação é bastante perceptível na escala de microparcela, onde nas concentrações apresentam um comportamento simples, havendo um padrão geral de diminuição destes valores ao longo do tempo, em oposição com as perdas mássicas que possuem uma grande variabilidade. As elevadas concentrações obtidas para os primeiros eventos, logo após o incêndio, podem estar associadas à camada superficial de cinzas rica em nutrientes, que é facilmente erodida e por isso é arrastada de modo preferencial pela escorrência nos primeiros eventos de chuva.

Ferreira *et al.* (2005), na determinação da fracção dissolvida, indica que as maiores perdas de nutrientes ocorrem nos primeiros 4 meses depois do incêndio, existindo apenas picos de perdas após este período, associados a grandes eventos de precipitação. Este estudo, por ser relativo a um período de 6 meses e apenas terem sido analisados os dois maiores eventos de precipitação de cada mês, não é possível de ser observada/confirmada esta tendência, sendo o foco deste trabalho na ocorrência das maiores mobilizações de nutrientes. No entanto observa-se que nas últimas amostragens, para eventos de precipitação mais elevados comparativamente aos das primeiras semanas logo após o incêndio, verificam-se valores semelhantes ou inferiores, de perda de nutrientes.

Shakesby (2011) refere que, embora possam existir alterações no solo após fogo, de modo a permitir um armazenamento temporário localizado de água, de forma geral este provoca um aumento da taxa de escorrência superficial logo que é atingido o limiar da capacidade de infiltração. Este aumento pode ser resultado da escorrência da água em excesso que já não infiltra depois do solo atingir a sua saturação, da hidrofobia do solo e da combustão completa ou parcial da vegetação e “litter” que permitem que haja uma maior percentagem de água disponível para escorrência superficial. Vários são os estudos que indicam que em áreas queimadas se verificam níveis de escorrência superiores que em não queimadas (Coelho *et al.*, 2004; Ferreira *et al.*, 2005). Os resultados obtidos neste estudo comparativamente à escorrência entre as encostas queimadas e a Não queimado, não mostram uma coerência para esse tipo de comportamento. Enquanto a encosta queimada, Eucaliptal granítico, apresenta os níveis de escorrência mais elevados, as encostas queimadas Eucaliptal xistoso e a Pinhal apresentam, ao fim do período de amostragem, escorrências semelhantes à encosta Não queimado. Estes valores são resultado das primeiras amostragens, onde a encosta Não queimado possui escorrência mais elevada que as encostas queimadas. Este intervalo do período de amostragem corresponde às primeiras semanas após incêndio, onde a precipitação foi reduzida. Este comportamento é quebrado após a ocorrência do primeiro

pico de precipitação, que não está reportado no presente estudo, apresentando depois valores bastante reduzidos. São vários os fenómenos e processos que podem explicar estes elevados valores iniciais, para a escorrência na encosta não ardida em comparação às encostas queimadas. Cerdà e Doerr (2005) aludem à possível ocorrência de uma redução da hidrofobia e um aumento na capacidade de infiltração no solo, após incêndios florestais severos no seguimento de períodos secos, onde a hidrofobia é elevada, o que vai de acordo ao encontrado por Varela *et al.* (2005) que indica que para áreas não ardidas, onde os solos apresentem uma repelência à água severa, o fogo irá provocar uma diminuição dos valores de repelência à água. Uma explicação para esta diminuição é dada por Doerr *et al.* (2006), que indica que numa área de eucalipto encontrou uma diminuição da repelência à água após fogo, na camada superior mas um aumento desta nas camadas mais profundas. Por outro lado, Shakesby e Doerr (2006) apontam que durante o fogo existe a volatilização das substâncias orgânicas hidrofóbicas no “litter” e na camada de solo superficial, que cria nesta camada um gradiente de pressão fazendo com que uma fracção deste matéria escape para a atmosfera, seja transportada ao longo da encosta até esta condensar ou seja transferida para as camadas mais profundas do solo, fazendo assim com que a camada superior tenha uma diminuição da hidrofobia. Em combinação com o revestimento de uma camada de cinzas após fogo, de acordo com Cerdà e Doerr (2008) o solo apresenta elevada capacidade de infiltração e uma escorrência superficial reduzida. Estes processos combinados sugerem uma explicação para este comportamento após incêndio, sendo este quebrado no primeiro evento de precipitação que seja suficientemente elevado para saturar o solo e dar início a uma maior taxa de escorrência superficial.

Thomas *et al.* (2000b) encontrou para parcelas de 16m², escorrências maiores para as encostas de pinhal do que para as de eucaliptal, no centro norte de Portugal, tendo no entanto um comportamento oposto para a perda de nutrientes, apresentando o eucaliptal maiores perdas. No entanto, no presente estudo verifica-se para a encosta Eucaliptal granítico, à escada de encosta, os maiores volumes de escorrência, enquanto as encostas Eucaliptal xistoso e Pinhal apresentam quantidades semelhantes. Para os valores elevados da encosta Eucaliptal granítico existem factores influenciadores que podem justificar este comportamento: a sua grande área de drenagem (154m²) e o declive acentuado 25,6 °. Já para os valores mais elevados de escorrência observados na encosta Pinhal, relativamente à de Eucaliptal xistoso, outros factores explicativos têm de ser tidos em conta, uma vez que possuem áreas semelhantes e declives idênticos. Nomeadamente: a diferença de profundidade do solo destas duas encostas. Embora

apresentem a mesma rocha mãe (Xisto), a profundidade a que esta se encontra nas encostas é bastante diferente. Enquanto a encosta Eucaliptal xistoso atinge-a aos 100 cm de profundidade a encosta Pinhal apenas apresenta 15 cm de solo antes de encontrar-se a rocha mãe. Consequentemente, a capacidade de infiltração da encosta Pinhal é muito mais reduzida que a Eucaliptal xistoso.

No presente estudo, observa-se claramente uma diminuição dos valores de escorrência e perda de sedimentos, da escala de microparcela para a escala de encosta. Este comportamento está de acordo ao encontrado em vários estudos (Coelho *et al.*, 2004; Boix-Fayos *et al.*, 2006). As dimensões das parcelas são o factor chave destas diferenças. Coelho *et al.* (2004) indica que em áreas maiores existe também uma maior variabilidade espacial, e que devido à existência de macroporos e zonas hidrófilas permite que haja a infiltração da água quando se está perante uma camada repelente, o que acontece após fogo. Esta maior variabilidade vai fomentar a que os coeficientes de escorrência encontrados na escala de encosta sejam menores. Os mesmos autores referem ainda que esta camada repelente à água seja mais severa e com distribuição contínua no solo, quanto mais intenso é o incêndio. Embora outros estudos (Cerdà e Doerr, 2005; Keizer *et al.*, 2008), indiquem que a existência de elevada repelência do solo à água pode estar relacionada com a vegetação existente e associada aos períodos secos.

Neste trabalho observou-se uma perda de sedimentos à escala de encosta mais elevada nas encostas de eucaliptal do que para as encostas Pinhal (queimado) e Não queimado. Na encosta Pinhal, as menores perdas de sedimentos na escala de encosta, provêm do papel importante desempenhado pela caruma de pinheiro que caiu da copa das árvores após o incêndio, que funcionam como mitigadoras da erosão ao reter os sedimentos perdidos por escorrência superficial e minimizando os efeitos do impacto da chuva no solo, atuando como uma manta protetora. Este efeito foi observado por Thomas *et al.*, (2000a), que obteve maiores perdas de sedimentos quando se retirava a camada de caruma de pinheiro que revestia o solo. Por sua vez, à escala de escala de microparcela este efeito não é verificado, onde, para o período de amostragem, ocorreu a seguinte ordem de perda de sedimentos: encosta Eucaliptal xistoso> Pinhal> Eucaliptal granítico.

2.8 Conclusões

Do presente estudo pode concluir-se que o tipo de uso florestal e a geologia do solo não induziu diferenças no teor de nutrientes no solo, e que o fogo não alterou a quantidade destes nutrientes no solo de 0-2 cm de profundidade, sugerindo que o incêndio não atingiu temperaturas suficientemente elevadas, para haver perdas de nutrientes por volatilização.

Na comparação das escalas de microparcela e encosta, é na microparcela onde os efeitos do incêndio são mais notórios, apresentando maiores escorrências, perda de sedimentos e perda de nutrientes.

As encostas queimadas possuem maiores perdas de nutrientes, sendo o K o mais mobilizado pela escorrência, e o Mg o que menores perdas sofre.

Verifica-se que entre o início e fim do período de amostragem, existiu um aumento no teor de Ca, no solo de 0-2 cm de profundidade. Este incremento nas encostas queimadas pode ser devido à transferência do mesmo, da camada de cinzas para esta camada de solo. No entanto, esta sugestão não explica a existência do mesmo comportamento na encosta Não queimada, onde ao longo do período de amostragem não existiu distúrbios para esta encosta.

A perda de nutrientes após incêndio resulta de uma combinação de processos: a combustão da vegetação que protege o solo contra os processos erosivos da chuva e escorrência; da camada de cinzas que reveste o solo após incêndio, rica em nutrientes que é facilmente erodida; dos grandes eventos de precipitação associados a elevadas intensidades que fazem, aumentar a perda de sedimentos.

Neste estudo, denota-se a existência de uma relação entre a perda de nutrientes e a perda de sedimentos, para ambas as escalas, i.e., maiores perdas de sedimentos implicam maiores perdas de nutrientes.

Para se obter uma compreensão global das perdas totais associadas a um incêndio, recomenda-se associar a estes dados um estudo à deposição atmosférica dos nutrientes, à determinação da fracção dissolvida e permutável na escorrência e um prolongamento do estudo para observar a janela de perturbações.

CAPÍTULO 3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após incêndio, um ecossistema florestal sofre várias alterações a nível do solo e dos nutrientes. Este estudo mostra que existe uma perda de nutrientes associada a este fenómeno. Esta perda pode dar-se por vários processos como é referido em vários estudos. Através da combustão da vegetação e da camada superficial de “litter” que atua como proteção do solo contra os processos erosivos da chuva e da escorrência, aumentado assim a perda de nutrientes tanto na forma solúvel, associada à escorrência, quer na forma permutável e fixa adjacente à perda dos sedimentos. A incineração desta vegetação vai induzir a formação de uma camada de cinzas que, por sua vez, vai revestir o solo e é rica em nutrientes, sendo facilmente erodida (Thomas *et al.*, 1999). As cinzas vão levar a que, logo que exista um evento de pluviosidade, capaz de exceder o seu limite de capacidade de infiltração, se inicie o processo de escorrência, onde as águas arrastam consigo nutrientes (Ferreira *et al.*, 2005). Os grandes eventos de precipitação associados a elevadas intensidades promovem a perda de sedimentos, e por consequência uma maior perda de nutrientes.

Os solos da área de estudo são ricos em K, e tanto para as encostas queimadas como para a Não queimado, a sua reserva de nutrientes é semelhante. Este resultado mostra que o tipo de uso (*Eucalyptus globulus* e *Pinus pinaster*) e geologia (granito e xisto) não provocam alterações nas quantidades deste nutriente no solo. Demonstra também que o fogo não afectou a reserva deste nutriente no solo, uma vez que o nutriente K tem o menor ponto de volatilização (sendo assim o que teria as menores perdas por este processo) e os seus teores no solo são os mais elevados, e semelhantes nas encostas queimadas e não queimadas. As cinzas apresentam também quantidades semelhantes de nutrientes nas encostas queimadas, indicando que a sua vegetação seria quimicamente semelhante.

Nas amostras de escorrência foram encontradas maiores concentrações e perdas mássicas de K. Enquanto a nível de concentrações os valores mais elevados correspondem ao primeiro evento de chuva após incêndio, para as perdas mássicas estes valores são atingidos quando ocorrem picos de precipitação e, por associação, maiores escorrências. Denota-se assim que as perdas mássicas são influenciadas pela quantidade de escorrência e os maiores valores de concentração são induzidos pela escorrência preferencial das partículas finas e leves, como as cinzas, que revestem o solo após incêndio e que são facilmente erodidas e ricas em nutrientes, levando à

existência de quantidades elevadas de nutrientes em quantidades reduzidas de escorrência.

O efeito do incêndio é mais visível à escala de microparcela, que apresenta maior escorrência, perda de sedimentos e nutrientes. À escala de encosta foram encontradas diferenças a nível de perda de sedimentos nas encostas de eucaliptal e Pinhal, apresentando esta última, valores semelhantes à não ardida, sendo possivelmente explicado pela camada de caruma que reveste o solo, retendo os sedimentos. À escala de microparcela os resultados obtidos não permitem retirar conclusões a nível da comparação entre encostas.

Sugere-se para futuros trabalhos um estudo da entrada de nutrientes por deposição húmida (precipitação) e a determinação das perdas de nutrientes nas suas diferentes formas, para compreender melhor como estas ocorrem.

A nível da metodologia usada sugere-se um estudo mais prolongado e que sejam igualmente estudados diferentes métodos de análise de nutrientes, de forma a obter-se metodologias de mais rápida execução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFN (2010). Relatório Anual de Áreas Ardidas e Ocorrências. Autoridade Florestal Nacional.
- APHA (1999). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association
- Attiwill, P. M., Adams, M. A., (1993). Nutrient cycling in forests. *New Phytologist* 124, 561-582.
- Boix-Fayos, C., Martínez-Mena, M., Calvo-Cases, A., Arnau-Rosalén, E., Albaladejo, J., Castillo, V. (2006). Causes and underlying processes of measurement variability in field erosion plots in Mediterranean conditions. *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 85–101.
- Carter, M. C., Foster, C. D. (2004). Prescribed burning and productivity in southern pine forests: a review. *Forest Ecology and Management* 191, 93-109.
- Cerdà, A., Doerr, S. H. (2005). The influence of vegetation recovery on soil hydrology and erodibility following fire: an eleven-year research. *International Journal of Wildland Fire* 14, 423-437.
- Cerdà, A., Doerr, S. H. (2008). The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. *Catena* 74, 256–263.
- Coelho, C. O. A., Ferreira, A. J. D., Boulet, A. K., Keizer, J. J. (2004). Overland flow generation processes, erosion yields and solute loss following different intensity fires. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrology* 37, 233-240.
- Costa, J. B. (2004). Caracterização e Constituição do Solo. Fundação Calouste Gulbenkian, 5ª edição, Lisboa.
- DGRF (2006). Estratégia Nacional para as Florestas. Direcção Geral dos Recursos Florestais
- DGRF, (n.d.). Incêndios Florestais – Portugal – Totais nacionais. Direcção Geral de Recursos Florestais. Visto em: 8 de Novembro, 2011, em: <http://www.afn.min-agricultura.pt/portal/dudf/Resource/pdf/estatisticas/dgrf-totaisnacional-1980-2006.pdf>

Doerr, S. H., Shakesby, R. A., Blake, W. H., Chafer, C. J., Humphreys, G. S., Wallbrink, P. J. (2006). Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response. *Journal of Hydrology* 319, 295–311.

DRA-Centro (2002). Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Vouga, 1ª fase, Análise e diagnóstico da situação de referência. Análise biofísica, Anexos. Direcção Regional do Ambiente do Centro. Lisboa, Portugal.

Ferreira, A. J. D., Coelho, C. O. A., Walsh, R. P. D., Shakesby, R. A., Ceballos, A., Doerr, S. H. (2000). Hydrological implications of soil water-repellency in *Eucalyptus globulus* forests, north-central Portugal. *Journal of Hydrology* 231–232, 165–177.

Ferreira, A. J. D., Coelho, C. O. A., Boulet, A. K., Lopes, F. P. (2005). Temporal patterns of solute loss following wildfires in central Portugal. *International Journal of Wildland Fire* 14, 401-412.

Ferreira, A. J. D., Silva, J. S., Coelho, C. O. A., Boulet, A. K., Keizer, J. J. (2009). The Portuguese Experience in Managing Fire Effects In: *Fire Effects on soils and restoration strategies*. Cérda A. e Robichaud P. (eds) Land Reconstruction and Management. Vol. 5, 401-424pp.

Helvey, J. D., Tiedemann, A. R., Anderson, T. D. (1985). Plant nutrient losses by soil erosion and mass movement after wildfire. *Soil and Water Conservation* 40, 168-173.

IFN5 (2006). Relatório Final do 5.º Inventário Florestal Nacional. Direcção-Geral dos Recursos Florestais.

Johnson, D., Murphy, J. D., Walker, R. F., Glass, D. W., Miller, W. W. (2007). Wildfire effects on forest carbon and nutrient budgets. *Ecological Engineering* 31, 183-192.

Keizer, J. J., Doerr, S. H., Malvar, M. C., Prats, S. A., Ferreira, R. S. V., Oñate, M. G., Coelho, C. O. A., Ferreira, A. J. D. (2008). Temporal variation in topsoil water repellency in two recently burnt eucalypt stands in north-central Portugal. *Catena* 74.

Khanna P. K., Raison, R. J., Falkiner, R. A. (1994). Chemical properties of ash derived from *Eucalyptus* litter and its effects on forest soils. *Forest Ecology and Management* 66, 107-125.

Kutiel, P., Naveh, Z. (1987). The effect of fire on nutrients in pine forest soil. *Plant and Soil* 104, 269-274.

- Neary, D. G., Klopatek, C. C., DeBano, L. F., Ffolliott, P. F. (1999). Fire effects on belowground sustainability: A review and synthesis. *Forest Ecology and Management* 122, 51-71.
- Neary, D. G., Ryan, K. C., DeBano, L. F. (2005). Wildland fire in ecosystems. Effects of fire on soil and water. General Technical Report, vol. 4. Rocky Mountain Research Station, Forest Service, USDA, Fort Collins, Colorado. RMRS-GTR-42, Washington DC.
- Nunes, L., Patrício, M. S., Tomé, J., Tomé, M. (2010). Carbon stocks in Portuguese maritime pine stands. *Forest Systems* 19(3), 434-448.
- Raison, J. R., Khanna, P. K., Jacobsen, K. L. S. (2009). Effects of fire on forest nutrient cycles. In: Cerdà, A., Robichaud, P. R., eds. *Fire effects on soils and restoration strategies*. Enfield, NH: Science Publishers: 225 – 256.
- Ribeiro, C., Madeira, M., Araújo, M. C. (2002). Decomposition and nutrient release from leaf litter of *Eucalyptus globulus* grown under different water and nutrient regimes. *Forest Ecology and Management* 171, 31-41.
- Shakesby, R. A., Doerr, S. H. (2006). Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews* 74, 269– 307.
- Shakesby, R. A. (2011). Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Reviews* 105, 71-100.
- Soto, B., Diaz-Fierros, F. (1993). Interactions between plant ash leachates and soil. *International Journal of Wildland Fire* 3, 207-216.
- SSS (Soil Survey Staff) (1975). *Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Tan, K. H. (1996). *Soil Sampling, Preparation, and Analysis*. Marcel Dekker, New York
- Thomas, A. D., Walsh, R. P. D., Shakesby, R. A. (1999). Nutrient losses in eroded sediment after fire in eucalyptus and pine forests in the wet Mediterranean environment of northern Portugal. *Catena* 36, 283-302.
- Thomas, A. D., Walsh, R. P. D., Shakesby, R. A. (2000a). Post-fire forestry management and nutrient losses in eucalyptus and pine plantations, northern Portugal. *Land Degradation & Development* 11, 257-271.

Thomas, A. D., Walsh, R. P. D., Shakesby, R. A. (2000b). Solutes in overland flow following fire in eucalyptus and pine forests, northern Portugal. *Hydrological Processes* 14, 971-985.

Trabaud, L. (1994). The effect of fire on nutrient losses and cycling in *Quercus coccifera* garrigue (southern France). *Oecologia* 99, 379-386.

Varela, M. E., Benito, E., E., d. B. (2005). Impact of wildfires on surface water repellency in soils of northwest Spain. . *Hydrological Processes* 19, 3649-3657.

Varenes, A. (2003). *Produtividade dos solos e ambiente*. Escolar editora, Lisboa.

WRB (world references base for soil resources), (2006). *World Soil Resources Reports* Nº. 103, 2ª edição. FAO, Rome.

Yildiz, O., Esen, D., Sarginci, M., Toprak, B. (2010). Effects of forest fire on soil nutrients in Turkish pine (*Pinus brutia*, Ten) Ecosystems. *Journal of Environmental Biology* 31.